

Joni Vainionpää

3D KOMPONENTTIMENETELMÄN SO- VELTMINEN UNIVERSAALILIITOK- SESSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Joni Vainionpää: 3D Komponenttimenetelmän soveltaminen universaaliliitoksessa
Diplomityö, 65 sivua, 15 liitesivua
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2019

Tässä työssä on tutkittu universaaliliitoksen alkujäykkyyttä eurokoodin mukaisella komponenttimenetelmällä. Liitokseksi valittiin raollinen universaaliliitos. Työ rajattiin kattamaan pelkästään ruuvien leikkausjäykkyys sekä reunapuristusjäykkyys. Tutkimusongelmaksi havaittiin aikaisempien tutkimusten puute universaaliliitoksen jäykkyyden määrittämisessä. Liitosta lähtökohtaisesti pidetään aina jäykkänä.

Tämän työn aikana liitoksen yksittäisille osille muodostettiin ensin 2D rakennemallit. Tämän jälkeen muodostettiin 3D- rakennemalli kuvaamaan koko liitoksen käyttäytymistä. Rakennemalli rajoittuu liitoksen geometrian osalta uumassa 2 sarakkeeseen ja 4 riviin ruuveja. Laipoissa vastaavasti 2 sarakkeeseen ja 6 riviin ruuveja. Erilaiset kuormitukset, joita tällä rakennemallilla voidaan laskea ovat: normaalivoima, molemman suunnan taivutus sekä molempiin suuntiin tapahtuva leikkaus. Vääntöä ei tutkittu tässä työssä ollenkaan, mutta tässä kehitettyä rakennemallia on mahdollisuus soveltaa myös vääntöön, mutta se vaatii jatkotutkimuksia.

Liitoksen jäykkyys määritettiin ensin käsin laskemalla hyödyntämällä muodostettua rakennemallia. Käsinlaskennan tulos varmistettiin uudella Idea Statica nimisellä ohjelmistolla, joka perustuu komponenttimenetelmän ja FEM laskennan hyödyntämiseen. Uuden numeerisen simuloinnin luotettavuutta tutkittiin myös vertaamalla liitoksen voimajakaumien tuloksia aikaisemmin muissa tutkimuksissa saatuihin voimajakaumiin.

Tässä työssä käytetylle liitokselle onnistuttiin saamaan luotettava alkujäykkyys yhteen suuntaan taivutetulle ja vedetylle tai puristetulle liitokselle. Kahteen suuntaan taivutetulla liitoksella havaittiin suuria epäjohdonmukaisuuksia, joita on syytä tutkia jatkossa tarkemmin. Liitoksen luokittelulle jäykkyyden mukaan havaittiin, että liitos on osittain jäykkä.

Avainsanat: Universaaliliitos, komponenttimenetelmä, 3D-komponenttimenetelmä, alkujäykkyys, teräsrakenteet, liitos, CBFEM, komponenttipohjainen elementtimenetelmä, Idea Statica

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Joni Vainionpää: 3D Component method application on splice connection
Master of Science Thesis, 65 pages, 15 Appendix pages
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
May 2019

The focus of this thesis is to investigate the initial stiffness of the splice joint using the component method according to the Eurocode. The connection which was investigated in this thesis was splice connection that contains cap between two profiles. Thesis was limited to covering only the cutting stiffness of the screw and the bearing stiffness of the plates. The lack of previous studies in determining the rigidity of the splice connection was found to be a research problem. The assumption in this kind of connection is always considered to be rigid.

During this thesis, 2D structural models were first formed on the individual parts of the connection. Then 3D design model was formed to describe the behavior of the entire connection. The design is limited to the geometry of the joint in the web 2 column and 4 rows of screws. In flanges, respectively, 2 columns and 6 rows of screws. The various loads that can be calculated with this design model are: normal force, bending in both directions and shear in both directions. The torque was not investigated in this work, but the structural model from this thesis can be developed to torque, but it requires further research.

The stiffness of the connection was first determined by manually calculating using the formed structural model. The results of the manual calculations were confirmed by a new software called Idea Statica which based on the use of component method and FEM calculation. The reliability of the new numerical simulation was also investigated by comparing the results of the force distributions in other studies.

The joint used in this work was able to obtain a reliable initial stiffness for a one-way bent and tension or compressed connection. In a two-way bending, there were major inconsistencies that need to be studied more closely in the future. According to the stiffness of the joint classification, it was found that the joint is partially rigid.

Keywords: Splice connection, component method, 3D- component method, initial stiffness, steel structures, connection, CBFEM, component-based finite element method, Idea Statica,

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikka Oy:tä mahdollisuudesta tehdä diplomityö yritykselle. Kiitokset Juha Kukkoselle Sweco Rakennetekniikka Oy:stä työn aikana annetuista ohjeistuksista ja ohjauksesta. Lisäksi kiitokset myös työkavereille ajatustenvaihdosta ja ideointiin osallistumisesta. Iso kiitos kihlatulle työn oikolukemisesta sekä parannusehdotuksista. Kiitokset myös työn tarkastajille professori Sami Pajuselle sekä professori Kristo Melalle.

Tampereella, 26.4.2019

Joni Vainionpää

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TYÖN LÄHTÖKOHDAT	3
2.1	Liitostyypit	3
2.2	Ongelman asettelu	5
2.3	Työn aihe	6
2.4	Aikaisemmat tutkimukset	8
2.4.1	Voimajakauman määrittäminen	8
2.4.2	Reunapuristuskomponentin käyttö liitoksessa	9
3.	KOMPONENTTIMENETELMÄ	10
3.1	Taustateoriaa	12
3.1.1	Komponenttimenetelmän rakennemalli	12
3.1.2	Komponenttimenetelmän materiaalimalli	14
3.1.3	Reunapuristuskomponentti	15
3.2	Menetelmän rajoituksia	18
4.	KOMPONENTTIMENETELMÄN SOVELTAMINEN OSANA UNIVERSAALILIITOSTA	19
4.1	Tutkittavan liitososan esittely	19
4.2	Jousimallin muodostaminen liitoksen eri osille	21
4.2.1	Ruuvien ja reunapuristuksen yhteisvaikutuskomponentin muodostaminen	21
4.2.2	Liitososan 2D-jousimallin muodostaminen	24
4.2.3	Koko liitoksen 3D-jousimallin muodostaminen	27
4.3	Raollisen liitoksen alkujäykkyyden käsinlaskenta	29
4.3.1	Normaalivoima N	36
4.3.2	Vahvemman suunnan momentti M_y	37
4.3.3	Heikomman suunnan momentti M_z	38
4.3.4	Voimien yhteisvaikutus	38
4.3.5	Liitosluokitus jäykkyyden perusteella	39
4.4	Yhteenvedo	39
5.	FEM-VERTAILULASKELMAT	41
5.1	Vertailun luotettavuus	41
5.2	CBFEM ohjelmiston teoreettinen pohja	42
5.2.1	Levyt	42
5.2.2	Hitsit	43
5.2.3	Ruuvit	43
5.3	Aikaisemmat tulokset	44
5.3.1	Idea Statica vertailulaskenta	44
5.4	CBFEM vertailu luvun 4 laskentaan	50
6.	YHTEENVETO JA TULOKSET	57
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	61

LÄHTEET	63
---------------	----

LIITE A ALKUJÄYKKYYKSIEN KÄSINLASKENTA

LIITE B IDEA STATICAN VERTAILU AIKAISEMPIIN TULOKSIIN

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1-1. Universaaliliitoksen kaksi erilaista tyyppiä.....</i>	<i>1</i>
<i>Kuva 1-2. Tämän diplomityön aihepiiri ja sen rajapinnat muihin osa-alueisiin.</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2-1. Universaalijatkoksen luokittelu päätyypeittäin.</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 2-2. Kontaktityyppisen liitoksen ongelmia.</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 2-3. Vaihtoehtoisia tapoja tehdä universaaliliitos.</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 2-4. Kahteen suuntaan taivutettu universaaliliitos.</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 2-5. Normaali ja leikkausvoimalla kuormitettu evälevyliitos [12].....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 3-1. Komponenttimenetelmän peruseräite [15].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 3-2. Jousisysteemin jousien yhdistäminen sarjaan- ja rinnankytkennässä. [15].....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 3-3. Leikkausvoiman mallintaminen liitoksessa. muokattu lähteestä [13]</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3-4. Tutkimuksessa [13] esitetyt tukireaktiot eri kuormitusyhdistelmille.</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3-5. Erilaisia käytettäviä materiaalimalleja.</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 3-6. Reunapuristustyyppinen liitos.</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 3-7. Kuormituksen jälkeinen tilanne reunapuristuksella.</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 4-1. Tutkittavan liitoksen koordinaatisto.</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 4-2. Liitoksen tarkempi geometria laipassa ja uumassa.....</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 4-3. Komponenttien muodostaminen yksileikkeisessä liitoksessa vaihe vaiheelta.</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 4-4. Yksileikkeisen ruuvin ja reunapuristusjäykkyyden yhdistetty jäykkyystekijä.</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 4-5. Yksileikkeisen liitoksen epäkeskeisyyden vaikutus. [9, 30].....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 4-6. Komponenttien muodostaminen kaksileikkeisessä liitoksessa vaihe vaiheelta.</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 4-7. Kaksileikkeisen ruuvin ja reunapuristusjäykkyyden yhdistetty jäykkyystekijä.</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 4-8. Laippalevyn ruuvit numeroituna sekä alkuperäinen jousimalli laipan osuudelle.....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 4-9. Laippalevyn jousimallin yksinkertaistuksien vaihteita.</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 4-10. Laippalevyn lopullinen reunapuristuksen jousimalli.....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 4-11. Uumalevyn ruuvinreiät nimettynä sekä uuman lopullinen jousimalli.</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 4-12. 3D-jousimalli päältä päin.</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 4-13. Liitoksen 3D-jousimalli mitoilla esitettynä.</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 4-14. Laipan yhden ruuviryhmän jäykkyydet x- ja y-suunnassa.</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 4-15. Laippalevyn jäykkyyden tulokset ja rakennemallin geometria.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 4-16. kaksileikkeisen liitoksen jäykkyystekijät.....</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 4-17. Uuman yhden neljänneksen reikien jäykkyydet.</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 4-18. Uuman ja uumalevyn lopullinen jäykkyystekijä.</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 5-1. Esimerkki kontaktipinnan syntymisestä palkin alalaipan ja pilarin laipan välille. [28]</i>	<i>43</i>

<i>Kuva 5-2. Kuusikulmaisen ruuvin kannan sisään piirretty ympyrä sekä normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutusdiagrammi [7].....</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 5-3. Normaalivoiman kuormitustapauksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 5-4. Vahvemman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 5-5 Idea Staticasta saatu ruuvien voimajakauma laipan ruuveilla heikomman suunnan taivutuksessa.</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 5-6. Heikomman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 5-7. Molemman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 5-8. Molemman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 5-9. Molemman suunnan taivutuksen sekä normaalivoiman kuormitustapauksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.....</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 5-10. Kaksileikkeisen liitoksen eroavaisuudet normaalivoiman tilanteessa.....</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 5-11. Yksileikkeisen liitoksen eroavaisuudet normaalivoiman tilanteessa.</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 5-12. Erot vahvemman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 5-13. Erot heikomman suunnan taivutuksessa.</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 5-14. Momentti-kiertymäkuvaaja.....</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 6-1. Laippalevyn ruuvien leikkausvoimien resultantit.....</i>	<i>59</i>
<i>Kuva A-0-1. 2x2, 2x3 ja 4x1 ruuviryhmät.....</i>	<i>66</i>
<i>Kuva A-0-2. 4x2 ja 4x3 ruuviryhmät.....</i>	<i>67</i>
<i>Kuva A-0-3. 2x2, 4x2 ja 6x2 ruuviryhmät.....</i>	<i>68</i>
<i>Kuva A-0-4. Ruuviryhmien sijainti puristuskeskiöstä.....</i>	<i>70</i>
<i>Kuva A-0-5. Mittoja puristuskeskiön (P.K.) suhteen.</i>	<i>71</i>
<i>Kuva A-0-6. Ruuviryhmien sijainti puristuskeskiöstä.....</i>	<i>72</i>
<i>Kuva B-1 Eroavaisuudet laippalevyjen puristusvoimassa normaalivoimalla.....</i>	<i>73</i>
<i>Kuva B-2 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa normaalivoimalla.....</i>	<i>74</i>
<i>Kuva B-3 Eroavaisuudet uumalevyjen puristusvoimissa normaalivoimalla.....</i>	<i>75</i>
<i>Kuva B-4 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa normaalivoimalla.....</i>	<i>75</i>
<i>Kuva B-5 Eroavaisuudet laippalevyn puristusvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>76</i>
<i>Kuva B-6 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>76</i>
<i>Kuva B-7 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>77</i>
<i>Kuva B-8 Eroavaisuudet laippalevyn taivutusmomentille heikomman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>77</i>
<i>Kuva B-9 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimille heikomman suunnan taivutuksessa.....</i>	<i>78</i>

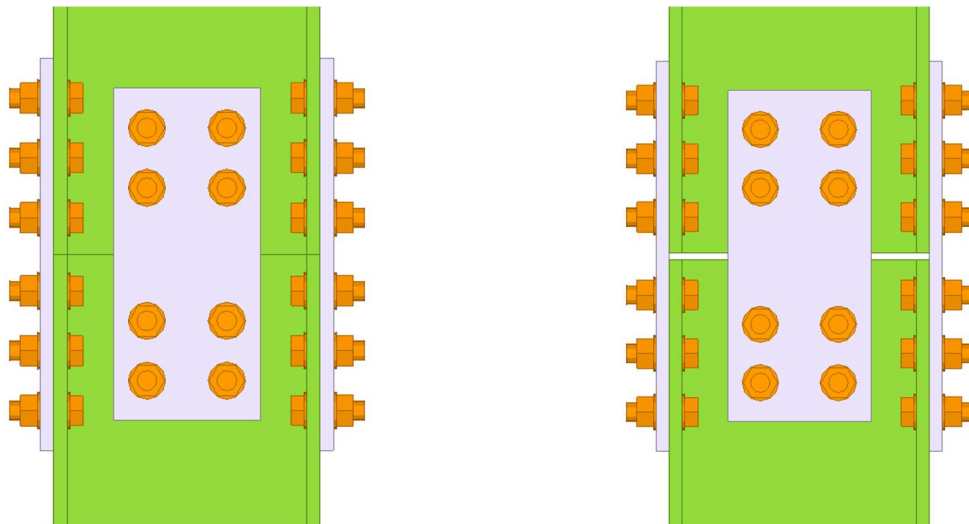
<i>Kuva B-10 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa molempiin suuntiin taivutetulla rakenteella.....</i>	<i>78</i>
<i>Kuva B-11 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa molempiin suuntiin taivutetulla rakenteella.....</i>	<i>79</i>
<i>Kuva B-12 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa yhdistetyssä kuormitustapauksessa.....</i>	<i>79</i>
<i>Kuva B-13 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa yhdistetyssä kuormitustapauksessa.....</i>	<i>80</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Universaaliliitos	Kahden profiilin välinen jatkosliitos, usein miten käytetään pilareiden jatkoksissa
SKOL ry	Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto
Eurokoodi 3	Eurooppalainen standardi, SFS-EN-1993
Komponenttimenetelmä	Eurokoodin hyväksymä menetelmä määrittää liitoksen kestävyys ja jäykkyys, tapa, jossa liitos pilkotaan useampaan pienempään osaan, komponenttiin.
MPC	engl. Multi-point constraint, monipisteinen rajoitus
FEM	engl. Finite element method, elementtimenetelmä
CBFEM	engl. Component based finite element method, komponenttimenetelmään perustuva elementtimenetelmä
Globaali laskentamalli	Malli, joka kattaa useampia osia ja liitoksia, joissa osat vaikuttavat toistensa toimintaan
Lokaali laskentamalli	Malli, jolla tarkoitetaan yksittäisen liitososan tai osan sisäistä laskentamallia, tapaa mallintaa asioita

1. JOHDANTO

Liitoksia mallinnettaessa globaaliin rakennemalliin pyritään ne mallintamaan mahdollisimman realistisesti. Tässä diplomityössä tutkitaan liitoksen alkujäykkyyden määrittystä. Tarkemmin sanottuna on tarkoitus selvittää, kuinka universaaliliitos käyttäytyy jäykkyyden näkökulmasta. Universaaliliitoksen jäykkyyden määrittämisestä on hyvin niukasti aikaisempia tutkimustuloksia. Aikaisempia tutkimuksia universaaliliitoksen rakenteellisesta kestävyydestä on useita [1-9], joten se jätettiin pois tästä työstä. Osassa näistä tutkimuksista käsitellään pelkästään kestävyyttä ja yhdessä tutkimuksessa on käsitelty asiaa myös kustannusten näkökulmasta.

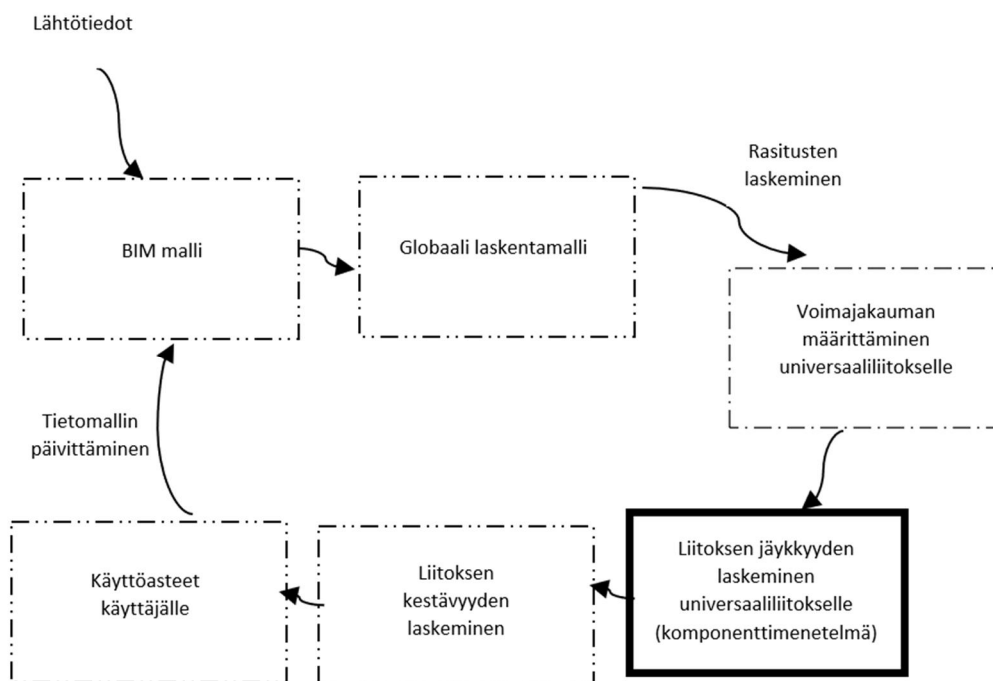


Kuva 1-1. *Universaaliliitoksen kaksi erilaista tyyppiä*

Tämä työ rajattiin koskemaan pelkästään raollista universaaliliitosta, kuten kuvassa 1-1 näytetään oikealla puolella. Työstä rajattiin pois kontaktilla toimiva universaaliliitos (kuva 1-1 vasemmanpuoleinen liitos). Työssä jäykkyyden määrittäminen rajattiin koskemaan pelkästään liitintä ja liitinten välistä jäykkyyttä. Jäykkyyden määrittämiseen osallistuu siis pelkästään liittimen leikkausjäykkyys sekä reunapuristusjäykkyys. Tämä valikoitui siitä syystä, että nämä kaksi ovat selkeästi kytköksissä toisiinsa ja muodostavat suurimman osan liitoksen jäykkyydestä. Diplomityössä on lähdetty ensin selvittämään teoreettista taustaa komponenttimenetelmälle, jonka jälkeen erinäisten tutkimusten ja teoreettisen pohjan jälkeen on päästy soveltamaan liitoksen rakennemallin luomista universaaliliitokseen. Rakennemallin luomisessa huomioidaan myös mahdolliset muut jäykkyydet, joita ei muuten tässä työssä oteta huomioon. Näin ollen tästä saatavaa tulosta, tai ainakin osaa siitä, voidaan hyödyntää tulevaisuudessa koko liitoksen jäykkyyttä määritettäessä.

Työtä tehdessä on lähdetty laskemaan käsin aikaisemmin muodostetulla jousimallilla liitoksen alkujäykkyudet. Jotta virhelähteet voitaisiin löytää, on liitos pilkottu useaan erillaiseen, liitosgeometrialtaan yksinkertaisempaan osaan ja näille erilaisille liitosgeometrioille ja erilaisille kuormille on laskettu alkujäykkyudet. Näitä aikaisemmin käsin laskettuja alkujäykkyysia on lähdetty vertailemaan CBFEM-perusteiseen (Component Based Finite Element Method) laskentaan. Ohjelma hyödyntää komponenttimenetelmää sekä elementtimenetelmää siinä kohtaa, kun komponenttimenetelmän tavat laskea jäävät puutteellisiksi. CBFEM- laskennan luotettavuutta tutkitaan tässä työssä vertailemalla siitä saatuja tuloksia aikaisemmassa tutkimuksessa [6] saatuihin tuloksiin.

Työn viitekehys muihin tutkimuksiin sekä koko toimintaympäristö on kuvattu kuvassa 1-2. Yleinen toimintatapa teräsrakennesuunnittelussa on mennyt niin, että liitokset ovat kuviteltu joko täysin jäykiksi tai täysin nivelellisiksi. Nykyisin pyritään mahdollisuuksien mukaan mallintamaan globaali rakenne mahdollisimman todenmukaiseksi. Tällä tavalla pyritään säästämään materiaalikustannuksissa. Tämä työ tarjoaa ratkaisun realistisemman globaalin laskentamallin luomiseen. Tulevaisuudessa rasiusten laskemisen jälkeen pystytään määrittämään liitoksen alkujäykkyys. Tämän jälkeen tai jopa samanaikaisesti mitoitetaan liitos. Mikäli liitos ei kestä ja liitoksen jäykkyys ei vastaa laskentamalliin syötettyä arvoa tehdään uudelleenlaskentaa. Näitä iterointikierrroksia voi olla useampikin, jonka jälkeen päästään lopulliseen haluttuun lopputulokseen. Pienissä laskentamalleissa tämä voisi onnistua jo tällä hetkellä, mutta laskentamallin kasvaessa suuremmaksi laskenta-ajat venyvät kohtuuttoman pitkiksi, joten realistisesti tämä menetelmä ei vielä toimi.



Kuva 1-2. Tämän diplomityön aihepiiri ja sen rajapinnat muihin osa-alueisiin.

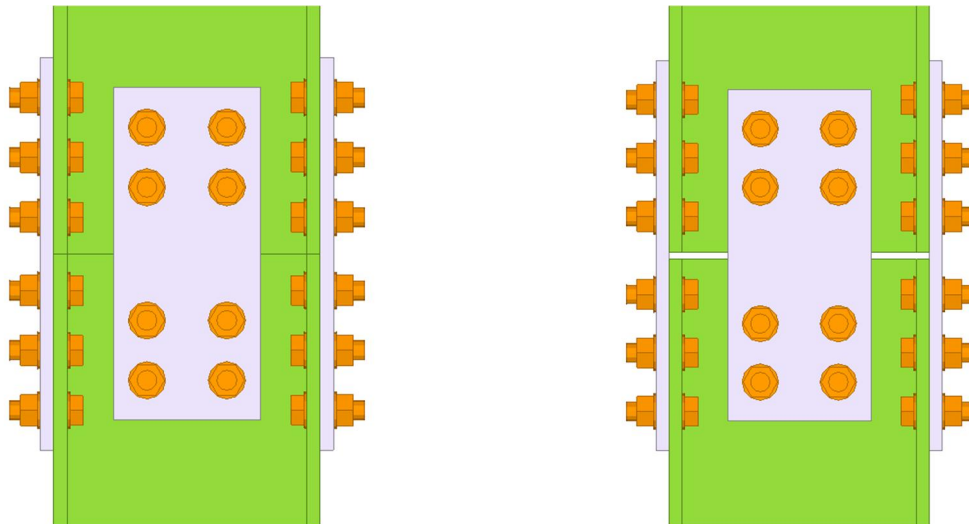
2. TYÖN LÄHTÖKOHDAT

Universaaliliitosta on käytetty jo pitkään, tuntematta täysin liitoksen käyttäytymistä useamman rasituksen vaikutuksen alaisena. Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liiton (SKOL ry) toteutti vuonna 2011 hankkeen [8], jossa yhdistettiin kaikki tiedossa oleva laskentatieto universaaliliitoksesta yhteen laskentapohjaan. Luvussa 2.2 kerrotaan lisää liitoksen ongelmasta, kuinka kaikkia mahdollisia kuormitusyhdistelmiä ei ole pystytty tutkimaan samanaikaisesti. Ennen aikaisemmin toteutettua diplomityötä [6] ei ole tarkkaan tiedetty kuinka esimerkiksi kahteen suuntaan taivutettu kontaktipinnoilla oleva universaaliliitos jakaa voimia ruuveille, levyille ja profiileille. Tästä syystä on turvauduttu varmalla puolella oleviin oletuksiin liitoksen toiminnasta ja liitoslevyjen paksuuksista.

Työ lähtee liikkeelle aikaisempien tutkimusten esittelyllä kappaleessa 2.1–2.4.2. Komponenttimenetelmää ja sen taustoja esitellään luvussa 3. Luvussa 4 sovelletaan komponenttimenetelmää osana universaaliliitosta. Luvussa 4.2 perehdytään ensin hyvin tarkalla tasolla kahden erilaisen komponentin toimintaan. Tämän jälkeen siirrytään tutkimaan isompaa kokonaisuutta yksittäisen liitososan kohdalla 2D-mallilla. Lopuksi tutkitaan koko liitosta ja sen mahdollisuuksia 3D-mallilla. Luvun 4.3 eri osioissa lasketaan käsin alkujäykkyydet erilaisille kuormitustapauksille sekä lopuksi eurokoodin [7, 10] mukainen liitoksen luokitus jäykkyyden perusteella. Luvussa 5 selvitetään ensin CBFEM-laskennan perusteita sekä vertaillaan ohjelman antamia voimajakaumia aikaisempiin tuloksiin. Seuraavassa luvussa 5.4 tehdään vertailua aikaisemmassa luvussa 4 käsin laskettuihin arvoihin. Luvussa 6 kootaan kaikki tulokset yhteen sekä viimeisessä luvussa 7 tehdään kaikista tuloksista yhteenveto. Liitteiksi siirrettiin tässä työssä alkujäykkyyden käsinlaskennan tarkemmat laskut sekä tarkemmat CBFEM laskennan vertailun tulokset aikaisempiin tuloksiin, jotta itse työ pysyisi mahdollisimman suoraviivaisena.

2.1 Liitostyypit

Universaaliliitos voidaan jakaa karkeasti kahdentyyppisiin liitoksiin. Ensimmäisenä on liitos, jossa kahden profiilin väliin ei jätetä ollenkaan rakoa kuten kuvassa 2-1 vasemmanpuoleinen liitos. Tämä on tyypiltään kontaktiliitos, joka siirtää osan puristusvoimista profiilin päiden kontaktipintojen välillä. Toinen liitostyyppi on kuvassa 2-1 oikealla puolella oleva raollinen liitos, jossa voimat siirtyvät pelkästään liitoslevyjen ja ruuvien välityksellä.



Kuva 2-1. *Universaalijatkoksen luokittelu päätyypeittäin.*

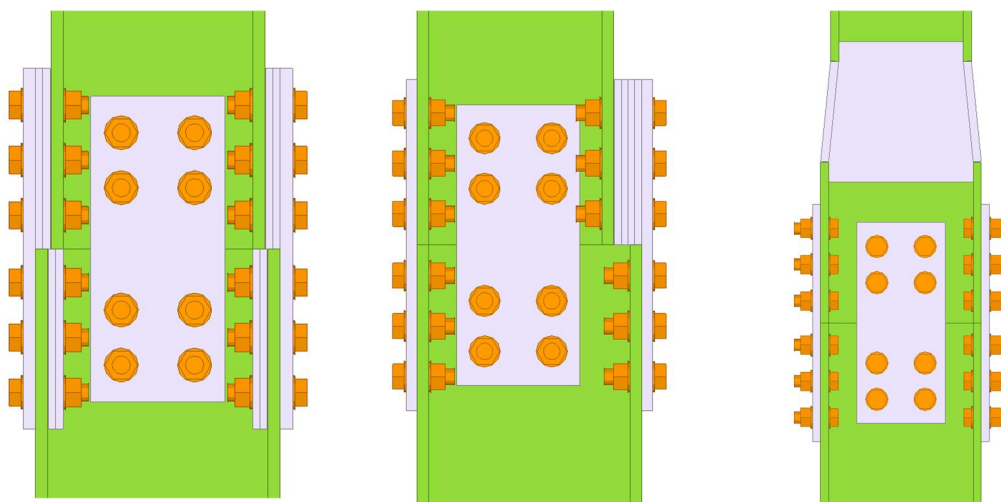
Kontaktiliitoksen kontaktin toteutus tuottaa monessa tapauksessa ongelmia. Profiilien ja liitososien valmistustoleranssit [11] ovat täydellisen kontaktipinnan luomiselle liian epätarkat. Usein liian tiukat aikataulut kuvien tuotannossa johtaa siihen, ettei jokaiseen tärkeään liitokseen ole mahdollista tehdä erityismainintaa tarkemmista valmistustoleransseista. Seuraavassa kuvassa 2-2 näytetään todellinen esimerkki kontaktiliitoksesta, jossa uumat eivät ole missään kohtaa kosketuksissa toisiinsa.

Raollisessa liitoksessa kaikki voimat siirretään liitoslevyjen välityksellä niiden jäykkyyksien suhteen. Raollisessa liitoksessa liitoslevyjen paksuus sekä ruuvien määrä kasvaa, mikäli liitoksen vaikuttaa suuri puristusvoima. Jos liitosta rasittaa suuri vetovoima, ei voida sanoa, että kontaktiliitos säästäisi merkittävästi ruuvien lukumäärää tai kasvattaisi levypaksuuksia. Raollisen liitoksen etuina voidaan sanoa, että sen toteutus on yksinkertaisempi sekä laskentamenetelmät ovat yksinkertaisempia kuin kontaktiliitoksessa.



Kuva 2-2. *Kontaktityyppisen liitoksen ongelmia.*

Universaaliliitoksen toteuttamisessa on olemassa useita eri variaatioita. Mikäli profiilin koko vaihtuu liitosalueella, muutos on mahdollista tehdä liitoksella kuten kuvassa 2-3 kaksi vasemmanpuoleisinta vaihtoehtoa. Näissä liitokseen lisätään täytelevyjä täyttämään kokoeron aiheuttama väli. Näissä kontaktin toiminta laippojen kohdalla on hankala määrittää. Vasemmanpuoleisimmat liitokset eivät ole voimien jakautumisen kannalta parhaimpia tapoja toteuttaa siirtymä isommasta profiilista pienempään, koska liitokseen muodostuu suuri epäkeskisyys sekä profiilin pienentyessä paljon ruuviliitokselle voi jäädä liian vähän tilaa. Kolmas vaihtoehto kuvassa 2-3 on varmin tapa tehdä profiilin koon muutos. Tässä liitosalueella pidetään sama profiili kuin alemmassa ja profiilin muutos tehdään vasta liitoksen jälkeen. Tämä ei aiheuta suuria jännityspiikkejä liitosalueelle tai profiileihin. Usein profiilit ovat hitsattuja profiileja, jolloin levyillä tehtävä kavennus on helppo toteuttaa. Mikäli voimat eivät ole suuria voidaan päätyä valssattuihin profiileihin. Valssatuilla profiileilla voidaan joutua käyttämään kuvassa 2-3 olevaa kahta vasemmanpuoleisinta tapaa toteuttaa liitos.



Kuva 2-3. Vaihtoehtoisia tapoja tehdä universaaliliitos.

2.2 Ongelman asettelu

Vuonna 2011 suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liiton (SKOL ry) alaisuudessa toteutettiin hanke [8], jossa erinäisiä laskentapohjia tehtiin eurokoodin mukaan. Tämän hankkeen yhteydessä tehtiin myös liitoslaskentapohja I-profiilin universaaliliitokseen. Tällöin universaaliliitoksen laskennassa on jouduttu tekemään kompromisseja ja yksinkertaistuksia siitä syystä, että ennen vuotta 2011 ei ole ollut tarkempaa tietoa kahteen suuntaan taivutetun liitoksen käyttäytymisestä ja voimajakaumasta. Universaaliliitos on luokiteltu aina jäykäksi. Luokittelu on tehty tällä tavoin riippumatta siitä, kuinka ohuita levypaksuuksia on käytetty. Tämä saattaa johtaa epävarmalla puolella olevaan oletukseen liitoksen jäykkyydestä. Liitoksen ollessa osittain jäykkä profiilin siirtymät sekä jännitysjaakauma rakenteessa ovat hyvin erilaiset kuin mitä täysin jäykällä liitoksella. Tällöin voimat jakaantuvat

monimutkaisemmissa rakenteissa uudelleen, joka voi johtaa muualla profiilien ja liitosten käyttöasteiden kasvamiseen.

Yksinkertaistuksia, joita on jouduttu tekemään universaaliliitoksen laskennassa, ovat tutkittavien kuormitustapausten määrä sekä voimajakauma. Mahdollisia tutkittavia kuormitustapauksia ovat voineet olla samaan aikaan tapahtuva taivutusmomentti ja leikkausvoima samassa tasossa. Toisena ongelmana on ollut alun perin se, että kontaktityypissä liitoksessa on oletettu automaattisesti puolet puristusvoimasta jakautuvan profiilin päiden välillä ja puolet liitoslevyjen välityksellä. Tämä 50 % on ollut aina sama riippumatta siitä, kuinka paksut liitoslevyt tai profiilin ainevahvuudet ovat olleet. [8]

2.3 Työn aihe

Tässä työssä liitoksen jäykkyyden määrittämiseen on käytetty komponenttimenetelmää. Komponenttimenetelmä on valittu tässä siitä syystä käsittelyyn, että komponenttimenetelmää voidaan helposti soveltaa myös moniin muihin samanlaisiin liitostyyppeihin. Ratkaisu ei rajoitu pelkästään universaaliliitokseen.

Tämä aihe valikoitui diplomityön tutkimuskohteeksi, koska komponenttimenetelmää ei ole juurikaan aikaisemmin sovellettu reunapuristuksella toimivaan liitokseen [12]. Reunapuristuksella toimivalla liitoksella tarkoitetaan sitä, että yksittäisten liitososien välillä on lähestulkoon pelkästään leikkausta. Tämä tarkoittaa myös sitä, ettei tässä tutkittavaa tapausta voida soveltaa esikiristettyjen kitkalla toimivien liitinten kanssa ennen kuin levyjen välillä oleva kitka pettää. Liitoksessa kaikki levyt ovat taivutettuja vahvempaan suuntaan eli ruuveille ei tule kuin leikkausta. Liitosmallina hyödynnetään 3D-rakennemallia liitoksen toiminnasta. Liitoksen jousimallit on kuvattu myöhemmin. Reunapuristuksella toimivaa liitosta on esitelty laskentaesimerkkien avulla seuraavassa tutkimuksessa [12] yksileikkeiseen evälevyliitokseen.

Komponenttimenetelmä soveltuu liitosmitoitukseen hyvin sen monipuolisten käyttötarjoitusten vuoksi. Yksittäistä komponenttia pystytään hyödyntämään useammassa liitoksessa sekä komponenttimenetelmä on yleisesti hyväksytty menetelmä eurokoodin osassa 3 luvussa 6 [7, 10]. Liitoksen peruskomponentteja valitaan liitoksen perusteella taulukosta ja niitä voidaan soveltaa yhdessä niihin kuuluvien soveltamissääntöjen kanssa lähes mihin liitokseen tahansa. Komponenttimenetelmällä saadaan määritettyä liitoksen kestävyys sekä jäykkyys. Koko liitokselle pystytään mallintamaan yksi jäykkyystekijä, joka muodostuu yksittäisten komponenttien yhdistelmästä. Näin pystytään globaaliin rakennemalliin syöttämään todellinen liitosjäykkyys ja saamaan selville rakenteen todellinen käyttäytyminen sekä rasitukset.

Tutkimusongelmat, joihin tässä työssä haetaan vastausta ovat seuraavat:

- Kuinka hyvin reunapuristuskomponentti soveltuu universaaliliitoksen jäykkyyden laskentaan?
- Voidaanko saatua tulosta pitää luotettavana jäykkyyden osalta?
- Mitä virhelähteitä voidaan havaita käsinlaskennassa tai numeerisessa simuloinnissa?

Ensimmäiseen kysymykseen vastausta haetaan soveltamalla komponenttimenetelmää universaaliliitokseen kokonaisuudessaan sekä pilkkomalla liitos useampaan pienempään osaan. Liitokseen kohdistetaan normaalivoimaa sekä molemman suunnan taivutusta. Asiaa käsitellään luvussa 4. Komponenttimenetelmän soveltaminen osana universaaliliitoksesta. Kuvassa 2-4 osoitetaan ne kuormitustapaukset, joita tässä työssä pääsääntöisesti tutkitaan sekä näytetään liitoksen pääakselien suunnat. Näiden kolmen kuorman lisäksi on tarkoitus ottaa huomioon myös leikkausvoiman vaikutus yhtenä liitoksen kuormituksesta. Tässä työssä on tarkoitus pohtia sitä, kuinka suuren virheen liitokseen tuleva leikkausvoima aiheuttaa lopulliseen laskentaan ja jäykkyyteen. Leikkausvoimaa käsitteleviä tutkimuksia komponenttimenetelmän kannalta löytyy hyvin vähän [13]. Leikkausvoima jätetään yleensä huomiotta niin, että se hoidetaan jollain toisella liitokseen liittyvällä leikkausvoimilla vievällä osalla. Esimerkkinä toimii tukipalalla oleva päätylevyliitos, jossa kaikki leikkausvoimat siirretään päätylevyn kautta tukipalalle. Usein leikkausvoiman vaikutusta aksiaali- ja kiertymäjäykkyyteen ei pidetä olennaisena asiana [12].

Toiseen tutkimuskysymykseen vastataan luvussa 5 laskettavilla vertailulaskelmilla CBFEM teoriaa hyödyntävällä ohjelmistolla. Tarkoituksena on ensin varmentaa aikaisemmassa työssä [6] saadut voimajakaumat kyseisellä ohjelmistolla. Tällä saadaan varmistettua ohjelmiston toimivuus reunapuristuksella toimivassa liitoksessa voimajakaumaa määrittäessä. Tämän jälkeen verrataan liitoksen käyttäytymistä luvussa 4 saatuihin tuloksiin. Vertailulaskentaa tehdään sekä kokonaiselle liitokselle, että yksittäiselle liitososalle. Vertailu pilkotaan myös kuormitustapauksittain yksinkertaisiin osiin.

Kolmanteen kysymykseen vastataan, kun saadaan tulokset laskettua sekä käsin että numeerisella simuloinnilla. Tässä kohtaa suoritetaan myös pohdintaa perustuen aikaisempiin tuloksiin [6] voimajakaumista kyseiselle liitokselle.

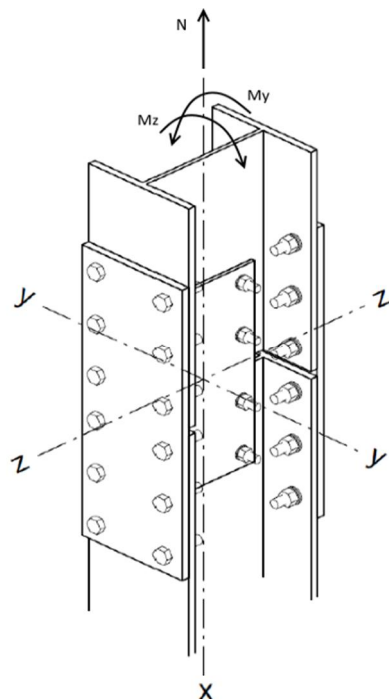
Syy miksi tässä tutkimuksessa käytetään CBFEM pohjaista elementtimenetelmää on se, että ohjelmisto perustuu komponenttimenetelmään ja antaa hyvän lähtökohdan juuri komponenttimenetelmän tutkimiseen sekä vertailuun. Luvussa 5.2 käsitellään kyseisen ohjelmiston teoreettista pohjaa ja pohditaan etukäteen sen mahdollisuuksia suoriutua laskennasta. Toinen syy ohjelmiston valintaan on sen mahdollisuus syrjäyttää perinteiset laskentapohjat helppokäyttöisyytensä sekä monipuolisuutensa vuoksi.

2.4 Aikaisemmat tutkimukset

Työn aihealueeseen liittyen on tehty muutama erilainen tutkimus. Luvussa 2.4.1 kerrotaan, kuinka universaaliliitoksen voimajakaumaa on määritetty kahteen suuntaan taivutetulle liitokselle. Luvussa 2.4.2 kerrotaan komponenttimenetelmän hyödyntämisestä reunapuristuksella toimivassa liitoksessa.

2.4.1 Voimajakauman määrittäminen

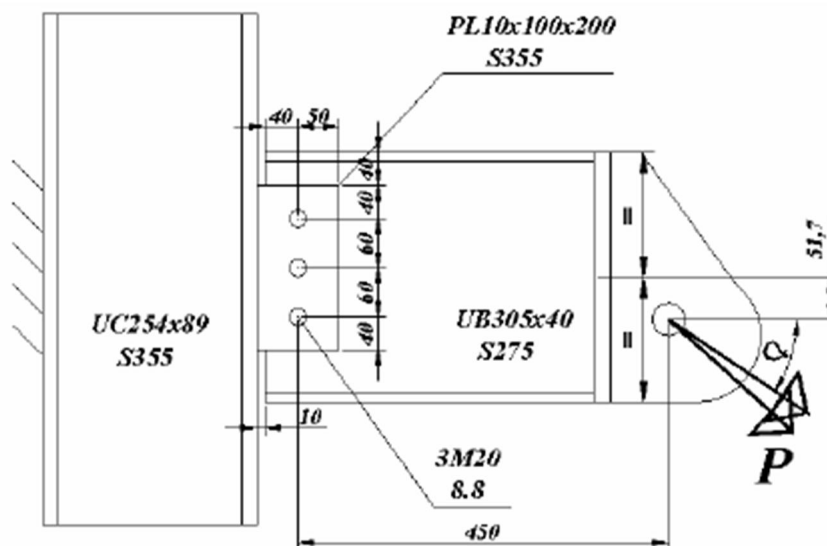
Tässä työssä hyödynnettäviä aikaisempia tutkimustuloksia ovat kahteen suuntaan taivutetun universaaliliitoksen voimajakaumasta [6] tehty tutkimus. Tätä aikaisempaa tutkimustulosta hyödynnetään siihen, että varmennutaan CBFEM ohjelman oikeanmukaisuudesta. Näin ollen sitä on mahdollisuus laajentaa yksirivistä liitosta monimutkaisempiin liitoksiin. Yksirivisellä kahteen suuntaan taivutetulla liitoksella tarkoitetaan kuvassa 2-4 havainnollistettua liitosta, jossa ruuvirivejä on vaakasuunnassa yksi molemmiin puolin laippaa. Liitos on myös taivutettu vahvempaan suuntaan M_y suuruisella momentilla ja heikompaan suuntaan M_z suuruisella momentilla. Lisäksi tässä kyseisessä liitoksessa on normaalivoimaa. Kuvassa 2-4 esitettyä liitosta ja kuormitustapausta tutkitaan tässä diplomityössä liitoskomponenttien kannalta. Leikkausvoiman osalta suoritetaan pohdintaa leikkausvoiman vaikutuksesta liitoksen käyttäytymiseen.



Kuva 2-4. Kahteen suuntaan taivutettu universaaliliitos.

2.4.2 Reunapuristuskomponentin käyttö liitoksessa

Toisena tärkeänä lähtökohtana hyödynnetään tutkimusta [12] komponenttimenetelmän käyttämisestä evälevyliitoksessa. Tämän tutkimuksen pohjalta lähdetään selvittämään reunapuristuksella toimivaa liitososaa ja sen soveltamista universaaliliitokseen. Tämä on harvoja tutkimuksia, joissa on näytetty laskennallisia esimerkkejä komponenttimenetelmästä reunapuristuksella toimivasta liitoksesta. Kyseisessä tutkimuksessa on kuitenkin rajoitettu kuormitustapauksia vain normaalivoimaan N sekä momenttiin M . Tässäkin tutkimuksessa [12] leikkausvoima on jätetty huomioimatta, mutta työssä on kuitenkin havainnollistettu kuinka sen pystyisi ottamaan huomioon ja tutkimuksessa [13] on esitetty tapoja siihen. Seuraavassa kuvassa 2-5 näytetään useammalla ruuvilla toteutettu evälevyliitos, jossa vaikuttaa normaalivoima, leikkausvoima sekä leikkausvoiman epäkeskisyydestä johtuva taivutusmomentti.



Kuva 2-5. Normaali ja leikkausvoimalla kuormitettu evälevyliitos [12]

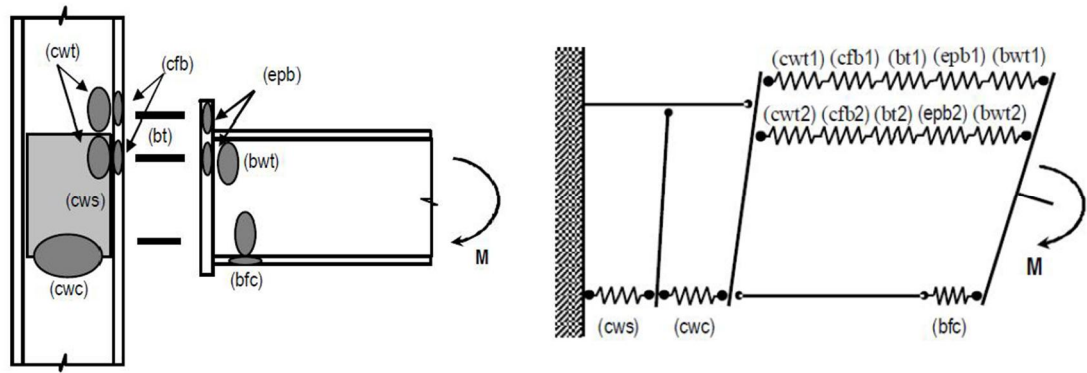
Tutkimuksia ja kokeita reunapuristuskomponenteista löytyy hyvin vähän. Tutkimukset painottuvat pitkälti vedettyihin ruuveihin sekä taivutettuihin rakenneseisiin, kuten päätylevyihin. Näitä tutkimuksia on tarkoitus hyödyntää mahdollisimman paljon komponenttimenetelmän taustateorian kartoitukseen. Eri tutkimusten [12, 13] erilaisia rakennemalleja on tarkoitus soveltaa tässä työssä.

3. KOMPONENTTIMENETELMÄ

Liitosten käyttäytymistä tutkittaessa törmätään usein ongelmaan, kuinka määritetään kaikki oleelliset liitoksen käyttäytymiseen vaikuttavat suureet: kestävyys, jäykkyys sekä liitoksen muodonmuutoskyky. Yhteisvaikutuksen tutkiminen on monimutkainen ilmiö ja näin ollen siihen on kehitetty yksinkertaistettu menetelmä, jonka avulla saadaan liitos pilkottua useampaan osaan. Näitä osia kutsutaan liitoksen komponenteiksi. Jokaisella komponentilla voidaan erikseen määrittää kestävyys, jäykkyys sekä näin ollen liitoksen muodonmuutoskyky. Pääsääntöisesti yhdessä komponentissa tutkitaan yksittäistä osaa, levyä tai ruuvia. Useasti on huomioitu myös se, että komponentin määrittämiseen voi osallistua myös muita osia kuin yksittäisiä ruuveja tai levyjä. Esimerkiksi päätylevyn taivutukseen kuuluu levyn taivutus, mutta siihen vaikuttaa se, että tutkitaanko yksittäistä ruuvia, ruuviriviä vai koko ruuviryhmää. Komponenttiin voi kuulua myös useampia erilaisia hitsejä, jotka siirtävät voimia ruuveille ja levyille. [14] Eurokoodi tarjoaa tällä hetkellä 20 erilaista peruskomponenttia, joiden yhdistelmillä pystytään laskemaan lukuisia erilaisia liitostyyppiejä [7]. Komponenttimenetelmää pystytään hyödyntämään myös erilaisten kuormitustapausten kanssa. Näin ollen pienellä määrällä peruskomponentteja pystytään analysoimaan suuri määrä erilaisia liitoksia ja kuormitustapauksia. Komponenttimenetelmää voidaan pitää siis erittäin universaalina tapana laskea liitoksia.

Komponenttimenetelmästä hyvänä esimerkkinä on kuvassa 3-1 esitetty päätylevyliitos [15]. Päätylevyliitoksessa kuvassa 3-1 vasemmalla esitetään erilaiset komponentit. Komponenttien lähtötiedot saadaan liitosgeometriasta, levypaksuuksista, ruuviväleistä ja niin edelleen. Näitä erilaisia komponentteja ovat pilarin uuman veto (cwt), pilarin laipan taivutus (cfb), ruuvin veto (bt), pilarin uuman leikkaus (cws), pilarin uuman puristus (cwc), päätylevyn taivutus (epb), palkin uuman veto (bwt) sekä palkin laipan puristus (bfc) [10]. Kuvassa 3-1 oikeanpuoleinen osa esittää kyseisistä komponenteista muodostettua rakennemallia. Siinä viitataan nimen perässä olevalla numeroilla vedettyihin ruuviriveihin 1 ja 2. Mallista nähdään myös todelliset etäisyydet vedettyjen ja puristettujen jousien välillä sekä jousien keskinäinen toiminta rinnan- ja sarjaankytkentä.

Kuvassa 3-1 esitetään jousia vedetylle ja puristetulle puolelle. Näitä erilaisia jousia yhdistää toisiinsa ideaalijäykät linkit. Linkkien välille on saatettu mallintaa erinäisiä niveliä tai liukutukia, joilla pyritään kuvaamaan mahdollisimman tarkasti liitoksen toimintaa. Tämän rakennemallin avulla voidaan muodostaa liitoksen alkukiertymäjäykkyys. Tässä työssä on tarkoitus muodostaa parhaimman tietämyksen mukainen jousijärjestelmä kuvaamaan universaaliliitoksen toimintaa.



Kuva 3-1. Komponenttimenetelmän peruseriaate [15]

Suunnittelijalla on tärkeä rooli komponenttimenetelmän käytössä. Suunnittelijalle tulee vastaan seuraavanlaisia ongelmia: komponenttien tunnistaminen, liitoksen luonnehdinta, liitoksen kokoonpano, luokittelu sekä mallintaminen. Yksittäisten liitososien komponenttien tunnistaminen saattaa olla hankalaa monimutkaisilla liitoksilla. Liitoksen luonnehtimisella tarkoitetaan liitososien tärkeimpien mekaanisten ominaisuuksien määrittämistä (kestävyys, jäykkyys ja muodonmuutoskyky). Liitoksen kokoonpanon ymmärtäminen on yksi tärkeimmistä tehtävistä. Siinä tulee ymmärtää liitoksen toimintaa ja näin ollen pitää pystyä yhdistämään oikeat komponentit toisiinsa, jotta saadaan liitoksen mekaaniset ominaisuudet selvitettyä. Liitoksen luokittelulla on tärkeä rooli globaalin rakennemallin muodostamisessa.[16, 17]

Eurokoodissa [7] komponentit ovat veto-, puristus- tai leikkauskomponentteja. Näillä erilaisilla yhdistelmillä voidaan kuitenkin muodostaa rakennemalleja, jotka pystyvät otamaan vastaan normaalivoimaa, taivutusta, leikkausta tai jopa näiden erilaisten yhdistelmiä. Monimutkaisemmassa kuormitusyhdistelmässä, jossa liitososana ruuvi joutuu sekä vedolle että leikkaukselle, rakennemallin muodostamisessa eri komponenttien välisten yhteyksien luominen muuttuu vaikeammaksi.

Teorian komponenttimenetelmä on siitä erikoinen, että siitä ei ole esitetty yleistä täydellisesti kattavaa kuvausta [17]. Tämä johtuu siitä, että eri komponenttien teoriat ovat kehittyneet toisista riippumattomasti ja eri tutkijoiden toimesta. Ajallisesti komponenttimenetelmän kehitys on tapahtunut viimeisen 35 vuoden aikana, joten se on teoriana uusi ja sitä ei ole vielä koottu yhteen teokseen. Eurokoodi [7] esittää pelkästään tutkimusten hyväksytyt lopputulokset. Seuraavassa luvussa esitellään hiukan komponenttimenetelmän kehitystä.

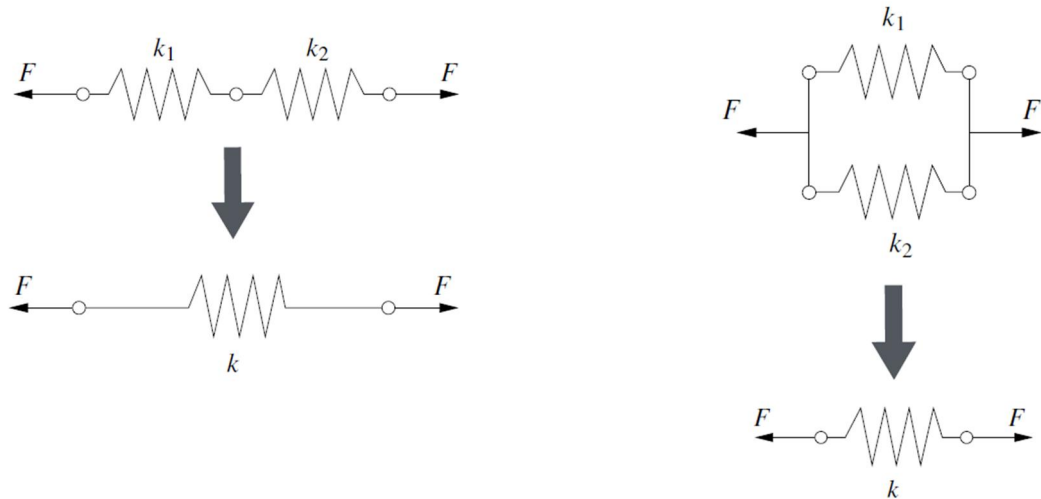
3.1 Taustateoriaa

Komponenttimenetelmää on aluksi kehitetty normaalilämpötilassa olevien osittain jäykkien liitosten käyttäytymisen mallintamiseen. Komponenttimenetelmää on lähdetty kehittämään vuonna 1983 [18]. Tämän tutkimuksen jälkeen on tehty myös Saksassa tutkimusta osittain jäykistä liitoksista vuonna 1987 [19]. Komponenttimenetelmää on hyödynnetty onnistuneesti usean tutkijan toimesta vuosina 1997-2001 kokeellisissa tutkimuksissa, joissa on selvitetty liitoksien toimivuutta palotilanteessa [20-22]. Ensimmäisen keran komponenttimenetelmä on päässyt Eurokoodin liitteeseen J [23] vuonna 1994. Normaalilämpötilassa komponenttimenetelmällä on tuotettu tarkka kuvailu liitoksen toiminnasta ja tätä kuvailua on hyödynnetty globaalin rakennemallin luomisessa [24-26]. Tämän hetkinen versio komponenttimenetelmästä löytyy Eurokoodin osasta 1993-1-8 [7]. Alun perin komponenttimenetelmällä pystyi arvioimaan kiertymisjäykkyyttä ja momenttikapasiteettia osittain jäykille liitoksille, kun liitos oli kuormitettu pelkästään taivutusmomentilla. Ongelmana olikin, että mikäli normaalivoiman suuruus kasvaa yli 5% palkin plastisesta normaalivoimakestävyydestä joudutaan se ottamaan huomioon. Näin ollen komponenttimenetelmän tutkimista on jatkettu kattamaan myös normaalivoima, leikkausvoima sekä taivutusmomentti yhdessä [13, 27]. Komponenttimenetelmällä saadaan kestävyyskannalta hyvinkin luotettavia tuloksia. Kestävyyslaskenta perustuu pitkälti plastisuusteoriaan. Plastisuusteoria tarjoaakin yksinkertaisen ja luotettavan tavan tutkia liitoksen kestävyttä [28].

Jäykkyyksien laskennassa normaalilämpötilalla sekä pienillä muodonmuutoksilla saavutetaan monesti hyvin luotettavia tuloksia. Tämä riippuu myös pitkälti toteutetusta rakennemallista ja sen todenmukaisuudesta. On olemassa joitain tiettyjä tapauksia, joissa tällä hetkellä jäykkyyksien muodostamista ei pidetä kovinkaan luotettavana. Näitä rajoituksia käydään läpi myöhemmässä luvussa 3.2.

3.1.1 Komponenttimenetelmän rakennemalli

Komponenttimenetelmässä jouset kuvataan yleensä geometrisesti lineaarisina kimmoisina jousina. Mikäli halutaan kuvata tarkemmin liitoksen materiaaleista johtuvaa epälineaarista käyttäytymistä, joudutaan käyttämään epälineaarisia muodonmuutoskäyriä [17]. Komponenttimenetelmässä jousisysteemiin toimii tavanomaiset laskusäännöt sarjaan- ja rinnankytkentään. Samassa jousisysteemissä voi samaan aikaan toimia sekä sarjaan- että rinnankytkettyjä jousia. Jousia voidaan yhdistää kuten kuvassa 3-2 esitetyllä tavalla vasemmalla puolella sarjaankytkentä ja oikealla puolella rinnankytkentä.



Kuva 3-2. Jousisysteemin jousien yhdistäminen sarjaan- ja rinnankytkennässä. [15]

Kuvassa 3-2 vasemmalla puolella on sarjaankytkettyjä jousia. Kaavassa (3.1) esitetään, kuinka useammasta sarjaankytketystä jousesta saadaan muodostettua yksi yhtenäinen jousi. Kaavalla (3.2) näytetään, kuinka rinnankytketyt jouset saadaan yhdistettyä yhdeksi jouseksi.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (3.1)$$

$$k = k_1 + k_2 \quad (3.2)$$

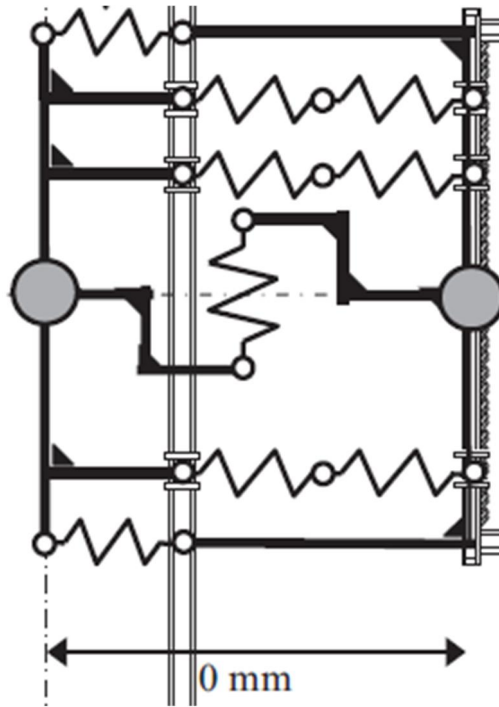
jossa k tarkoittaa koko jousisysteemin jäykkyyttä, k_1 ja k_2 kuvaavat yksittäisten joustien jäykkyyksiä. Yleisemmässä muodossa kyseiset kaavat (3.1) ja (3.2) voidaan esittää seuraavanlaisesti.

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

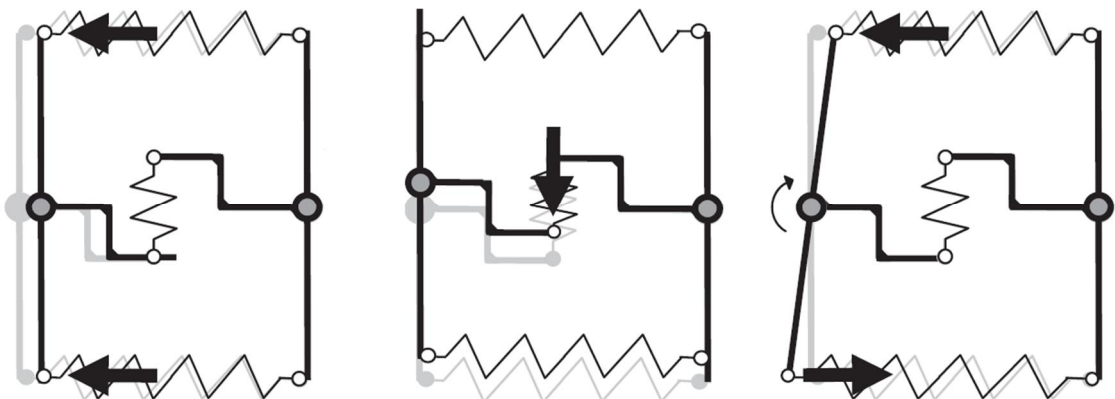
jossa summalla i :stä n :ään osoitetaan montako joustia voi olla peräkkäin tai rinnakkain.

Jakamalla liitokseen tuleva voima vaaka- ja pystysuuntaisiin komponentteihin voidaan luotettavasti määrittää liitoksen kestävyys. Tätä samaa periaatetta voidaan hyödyntää jäykkyyttä laskettaessa. Sijoittamalla pystysuuntainen jousi täysin kohtisuoraan vaakasuuntaisista jousista, voidaan pystysuuntainen ja vaakasuuntainen jäykkyys käsitellä erikseen [12, 13]. Kuvassa 3-3 esitetään jousimalli, jolla pystytään ottamaan vastaan leikkausvoimaa normaalivoiman ja taivutusmomentin lisäksi.



Kuva 3-3. Leikkausvoiman mallintaminen liitoksessa. muokattu lähteestä [13]

Kuvassa 3-4 näytetään kuinka edellä oleva kuvan 3-3 mukainen jousimalli toimii erinäisissä tilanteissa ottaessaan vastaan normaalivoimaa (vasemman puoleisin kuva), leikkausvoimaa (keskimmäinen kuva) tai taivutusmomenttia (oikean puolimmainen kuva).

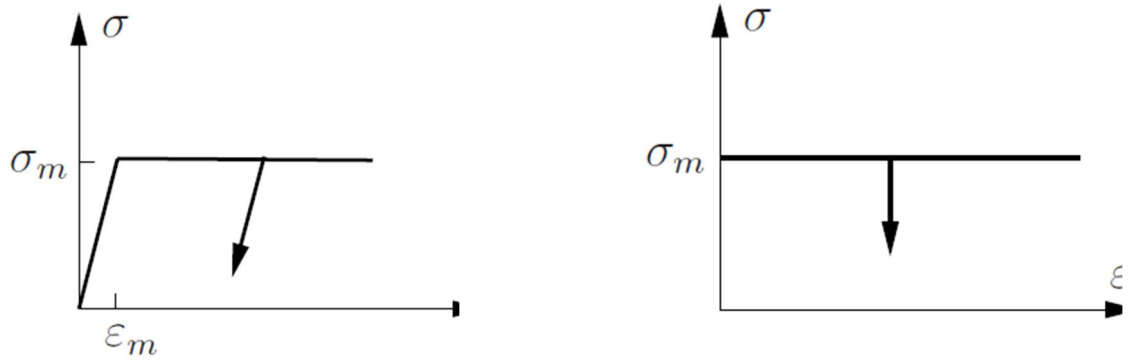


Kuva 3-4. Tutkimuksessa [13] esitetyt tukireaktiot eri kuormitusyhdistelmille.

3.1.2 Komponenttimenetelmän materiaalmalli

Tutkittaessa liitoksen kestävyyttä huomataan, että kimmoiset muodonmuutokset ovat hyvin pieniä verrattuna plastisiin muodonmuutoksiin. Näin ollen kimmoiset muodonmuutokset voidaan joko jättää huomioimatta ja keskittyä pelkästään plastisiin muodonmuutoksiin tai vaihtoehtoisesti huomioida lisäksi myös kimmoisen muodonmuutos. Tämän tiedon avulla voidaan käyttää joko kimmoista ideaaliplastista materiaalmallia kuten kuvassa 3-5 vasemmalla puolella oleva kuvaaja. Jos halutaan vielä yksinkertaistaa, voidaan käyttää jopa jäykkää ideaaliplastista materiaalmallia kuten kuvassa 3-5 oikealla puolella.

Kun laskenta halutaan pitää yksinkertaisena, mutta jokseenkin tarkkana voidaan käyttää kimmoista ideaaliplastista materiaalmallia, jossa kimmainen alue otetaan huomioon. Virhelähteenä näissä molemmissa materiaalmalleissa on se, että plastisella alueella ei tapahdu myötölujittumista. Näin ollen ei saada hyödynnettyä kaikkea teräksessä olevaa kapasiteettiä, kun taas muodonmuutos kasvaa suuremmaksi kuin todellisuudessa onkaan. [17, 29]



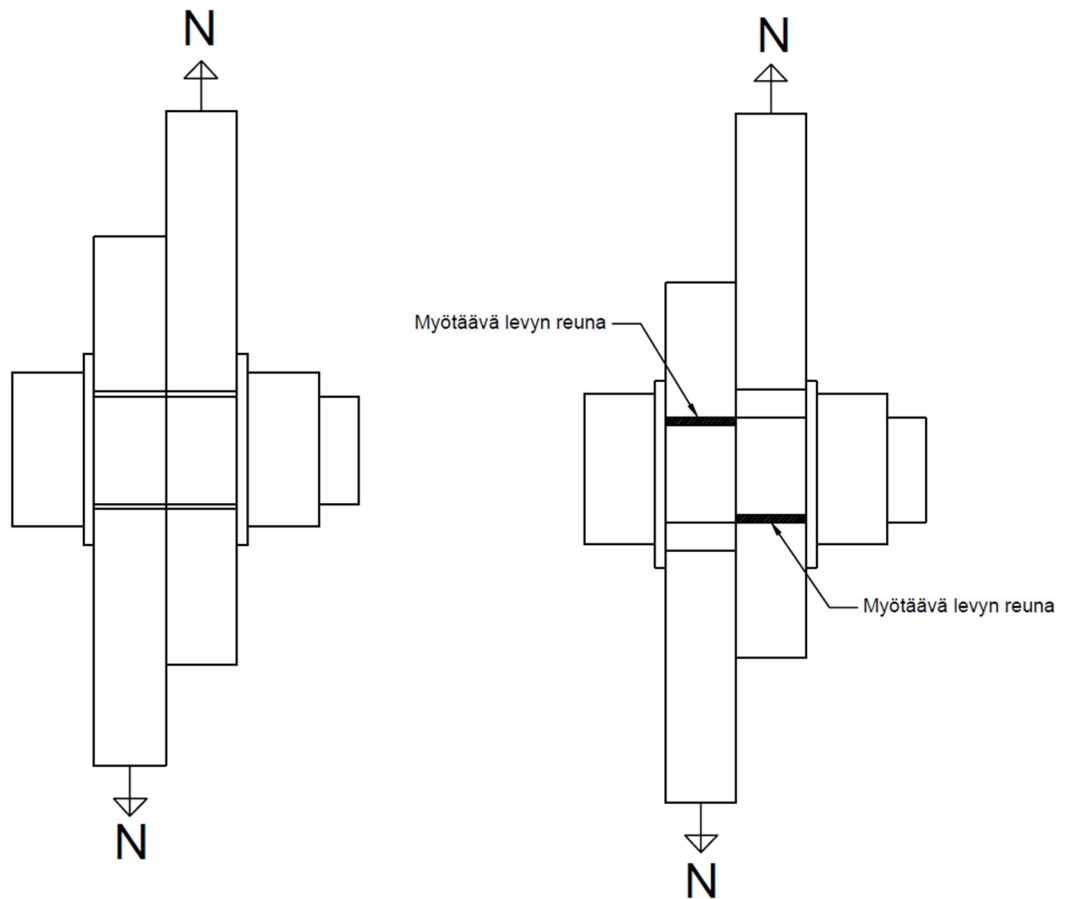
Kuva 3-5. Erilaisia käytettäviä materiaalmalleja.

3.1.3 Reunapuristuskomponentti

Kuvassa 3-6 vasemmalla havainnollistetaan alkutilannetta, ennen kuin leikkausliitosta aletaan kuormittamaan tai esikiristettyjen ruuvien kitka ei ole pettänyt. Oikealla puolestaan on samainen liitos, kun se on kuormitettu myötöön asti. Siinä ruuvien reiän reuna on alkanut myötäämään. Samalla ruuviin on syntynyt muodonmuutoksia leikkauspintaan. Ruuvien muodonmuutoksista on esitetty myöhemmin kuvassa 3-7 oikealla puolella. Jäykkyys ruuvien leikkaukselle löytyy eurokoodin luvusta 6.1.3 liitoksen peruskomponenteista [10].

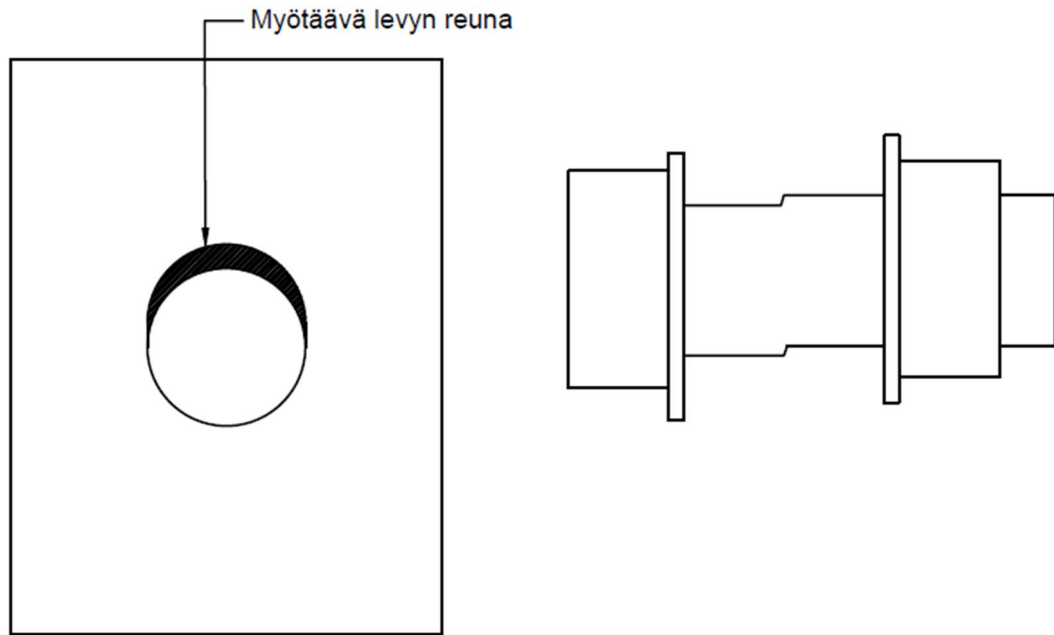
$$k_{11} = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{Ed_{M16}} \quad (3.3)$$

jossa k_{11} on yksittäisen osan jäykkyystekijä. Eurokoodissa tällä numerolla kuvataan jännittämättömän ruuvien leikkausta. n_b on leikkauksen rasittamien ruuvirivien lukumäärä, d on ruuvien halkaisija leikkauspinnassa, f_{ub} on ruuvien murtolujuus, E on ruuvien kimmoduuli sekä d_{M16} viittaa ruuvien M16 nimellishalkaisijaan.



Kuva 3-6. Reunapuristustyyppinen liitos.

Liitoksessa levyyn syntyy soikion muotoinen reikä, kun ruuvien reuna painuu siihen. Kuvassa 3-7 vasemmalla puolella havainnollistetaan syntyvän reiän muotoa. Levylle löytyy eurokoodin luvusta 6.1.3 [10] peruskomponenteista reunapuristuskestävyys sekä reunapuristuksen jäykkyys. Jäykkyyskomponentti kuvaa yhden levyn reunapuristusjäykkyyttä. Yksileikkeisessä liitoksessa siis tulee kaksi jäykkyyskomponenttia molemmille liitettäville levyille.



Kuva 3-7. Kuormituksen jälkeinen tilanne reunapuristuksella.

Seuraavassa on esitetty yhden levyn reunapuristusjäykkyyden komponentti.

$$k_{12} = \frac{24n_b k_b k_t d f_u}{E} \quad (3.4)$$

jossa k_{12} on jäykkyystekijä ruuvien reunapuristukselle jokaista komponenttia kohti, johon ruuvi tukeutuu. n_b on leikkauksen rasittamien ruuvirivien määrä. k_b on apusuure, joka lasketaan seuraavanlaisesti ja täytyy täyttää useampi ehto.

$$k_b = k_{b1}, \text{ mutta } k_b \leq k_{b2}$$

$$k_{b1} = 0,25 \frac{e_b}{d} + 0,5, \text{ mutta } k_{b1} \leq 1,25$$

$$k_{b2} = 0,25 \frac{p_b}{d} + 0,375, \text{ mutta } k_{b2} \leq 1,25$$

Jäykkyystekijän kaavassa k_t on myös apusuure, joka saadaan laskettua seuraavanlaisesti.

$$k_t = 1,5 \frac{t_j}{d_{M16}}, \text{ mutta } k_t \leq 2,5$$

Jäykkyystekijän kaavassa d tarkoittaa kyseisen ruuvin nimellishalkaisijaa, f_u perusaineen vetomurtolujuus, johon ruuvi tukeutuu sekä E on perusaineen kimmokerroin. Apusuureita laskettaessa e_b on ruuvirivin ja levyn vapaan reunan välinen etäisyys voiman suunnassa, p_b on ruuvirivien välinen etäisyys voiman suunnassa sekä t_j on tarkasteltavan komponentin paksuus eli perusaineen paksuus. d_{M16} tarkoitetaan samaa kuin kaavassa (3.5) eli ruuvin M16 nimellishalkaisijaan.

3.2 Menetelmän rajoituksia

Jäykkyyttä laskettaessa komponenttimenetelmällä saatetaan törmätä tilanteisiin, joissa komponenttimenetelmällä saadut tulokset tuottavat suuriakin virheitä. Laskettaessa esimerkiksi taivutetussa päätylevyssä ekvivalenttia T-osaa. T-osan laskennassa hyödynnettävä myötöviiviteoria lasketaan palkkiteorialla eikä päätylevyä tutkita kokonaan 2D tasona. Toisena ongelmana on se, että eurokoodi 3 ei ota huomioon liitoksissa alkuepä-tarkkuuksia. Alkuepä-tarkkuudet saattavat tuottaa kiertymään alussa suurenkin virheen, verrattuna ideaaliseen tilanteeseen. Tästä hyvänä esimerkkinä ruuvireissä oleva toleranssi, joka sallii palkin pään kiertymisen hiukan, ennen kuin liitosta on edes kuormitettu.

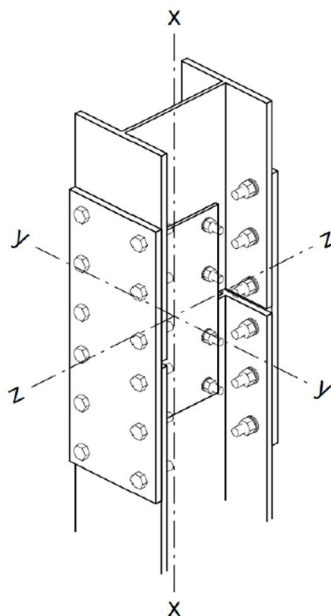
Useista pienistä ongelmalähteistä saattaa syntyä ongelma vedetyn puolen komponenteissa. Mikäli päätylevy on hyvin hoikka niin taivutetun päätylevyn komponentin merkitys koko liitoksen jäykkyyteen on todella suuri. Näin ollen koko liitoksen alkujäykkyys voidaan määrittää epävarmalle puolelle. Kun liitoksen jäykkyys on epävarmalla puolella, niin koko rakenteen rakennemalli ja voimajakaumat ovat epävarmalla puolella. Esimerkiksi tästä syystä Isossa-Britanniassa on eurokoodi 3:sen käyttö kielletty jäykkyyden osalta kansallisella dokumentilla. Komponenttimenetelmän komponenttien muodonmuutoskyvyn sekä jäykkyyden laskentaa täytyisi tulevaisuudessa tutkia merkittävästi enemmän, mikäli haluttaisi luotettavampia tuloksia. Kehitys ja tutkimustyötä täytyisi teettää enemmän, mutta yleensä suuret kokeelliset tutkimukset ovat todella kalliita. [17]

4. KOMPONENTTIMENETELMÄN SOVELTAMINEN OSANA UNIVERSAALILIITOSTA

Komponenttimenetelmää sovelletaan tässä diplomityössä yhden liitoksen osa-alueen tutkimiseen. Liitososaksi valikoitui profiilin ja liitoslevyn välisen ruuvin leikkaus- sekä reunapuristusliitos. Komponenttimenetelmällä on tarkoitus tutkia koko liitoksen toimintaa kyseiseen tarkoitukseen sovelletulla jousisysteemillä, jolla pystytään mallintamaan liitoksen realistinen käyttäytyminen. Reunapuristusjäykkyyden sekä liittimen leikkausjäykkyyden vaikutusta tutkitaan eri kuormituksilla: normaalivoima, vahvemman suunnan taivutuksella sekä heikomman suunnan taivutuksella. Liitostyyppinä toimii raollinen universaliliitos, jolla saadaan saavutettua paremmin todellisuutta kuvaavia tuloksia, kuten luvussa 2.1 on selitetty. Tarpeeksi iso rako profiilien välissä sallii liitososien kiertymisen ja liikkumisen ilman, että profiilit osuvat yhteen. Muutoin se muuttaisi olennaisesti liitoksen käyttäytymistä.

4.1 Tutkittavan liitososan esittely

Kuvassa 4-1 esitellään liitoksen pääkoordinaatisto. Liitokseen tulevat voimat vaikuttavat koordinaatiston akselien mukaisesti ja momentit kyseisten akselin ympäri. Symmetrisenä liitoksena positiivisella koordinaatistojen suunnalla ei ole merkitystä. Kokonaisen liitoksen geometriassa laipoissa on yksileikkeiset liitokset, joissa liitoksen molemmilla puolilla on kuusi kappaletta ruuveja. Uumassa on kaksileikkeinen liitos, jossa molemmin puolin liitosta on neljä kappaletta ruuveja.



Kuva 4-1. Tutkittavan liitoksen koordinaatisto.

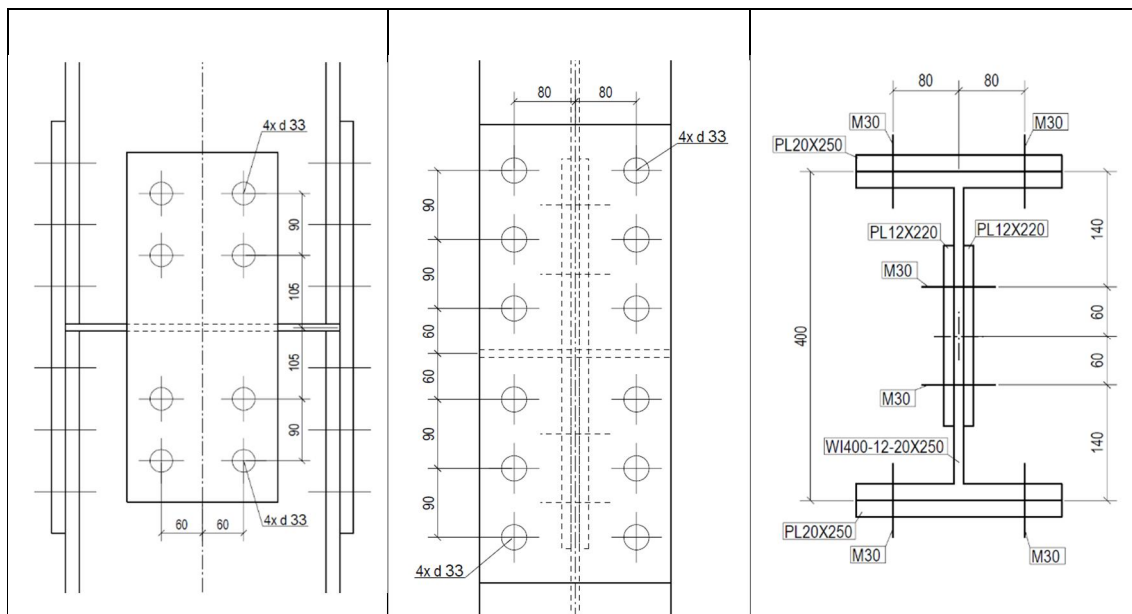
Liitoksen liitososien tietoja:

- laippalevyjen paksuus: $t_{fp} = 20mm$
- uumalevyjen paksuus: $t_{wp} = 12mm$
- ruuvien halkaisija: $d = 30mm$
- ruuvien reiän halkaisija: $d_0 = 33mm$
- perusaineen vetomurtolujuus: $f_u = 470MPa$
- kimmokerroin: $E = 210\,000MPa$

Liitettävien profiilin koko on WI400-12-20X250. Näin ollen:

- liitettävän profiilin korkeus $h_p = 400mm$
- profiilin leveys $b_p = 250mm$
- laippojen paksuus $t_f = 20mm$
- uuman paksuus $t_w = 12mm$

Seuraavassa kuvassa 4-2 näytetään tutkittavan liitoksen geometriaa, ruuvivälejä uumassa (vasemmanpuoleisin kuva), ruuvivälejä laipassa (keskimmäinen kuva) sekä liitoksen poikkileikkauksen geometriaa (oikeanpuoleisin kuva).



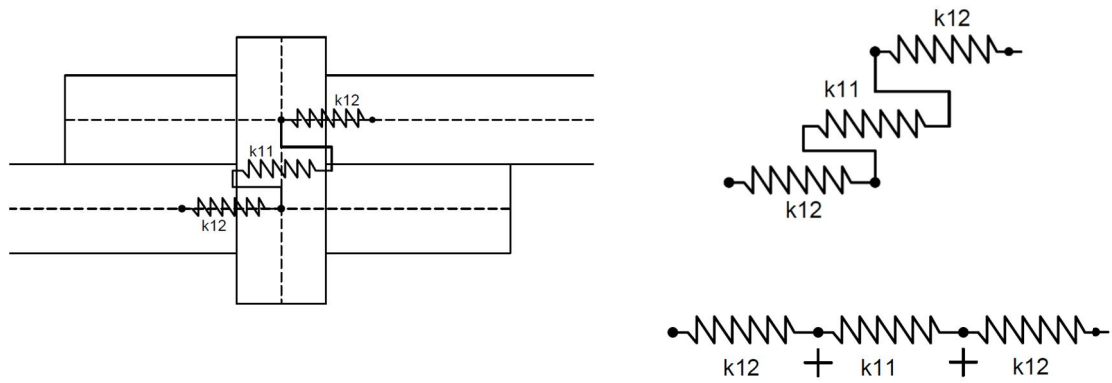
Kuva 4-2. Liitoksen tarkempi geometria laipassa ja uumassa.

4.2 Jousimallin muodostaminen liitoksen eri osille

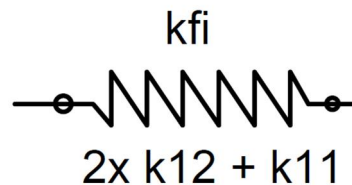
Jäykkyyden muodostaminen liitokselle voidaan tehdä kolmivaiheisesti. Tarkimmalla tasolla tutkitaan yksittäistä komponenttia ja sen vaikutusta viereisiin komponentteihin. Näistä muodostetaan yksi yksittäinen jäykkyysskomponentti kuten luvussa 4.2.1. Näitä yksittäisiä komponentteja on liitoksessa yhtä monta kuin on kiinnittimiä. Seuraavalla tasolla tutkitaan yksittäistä liitososaa. Tällöin voidaan jäykkyys muodostaa kaksiulotteisella jousisysteemillä. Kaksiulotteisuus riittää siitä syystä, että liitososa pystyy ottamaan vastaan sekä normaalivoimaa, että vahvemman suunnan taivutusta. Heikomman suunnan taivutusta ei tarvitse ottaa huomioon tutkittaessa yksittäistä liitososaa, joka kuuluu isompaan kokonaisuuteen. Tätä yksittäisen liitososan jousimallin muodostamista avataan enemmän luvussa 4.2.2. Karkeimman tason jousimallin avulla päästään paremmin käsiksi koko liitoksen toimintaan. Näin voidaan määrittää liitoksen globaali kiertymis- ja aksiaalijäykkyys. Luvussa 4.2.3 avataan tarkemmin liitoksen jousimallin luontia.

4.2.1 Ruuvien ja reunapuristuksen yhteisvaikutuskomponentin muodostaminen

Yksileikkeisen reunapuristusliitoksen jäykkyyden määrittämiseen kuuluu 2 kappaletta reunapuristusjäykkyyden komponenttia ja yksi ruuvien leikkausjäykkyys [12], kuten kuvassa 4-3 esitetään vasemmalla puolella. Vasemmanpuoleinen liitos on täysin tarkka versio, mutta tämän käyttäminen käytännössä ei ole kovin järkevää. Tätä jousisysteemiä on lähdetty avaamaan kuvassa oikealla puolella sekä muodostamaan yksinkertaisempaa mallia yhdistämällä eri jousia kuten kuvassa 4-4. Tällä menetelmällä päästään tarpeeksi tarkkaan ratkaisuun eurokoodin [7] mukaisesti. Kaikki jouset ovat sarjaan kytkettyjä ja niihin pätee samat yhteenlaskusäännöt kuin mitä aiemmin kaavassa (3.1) on esitetty.

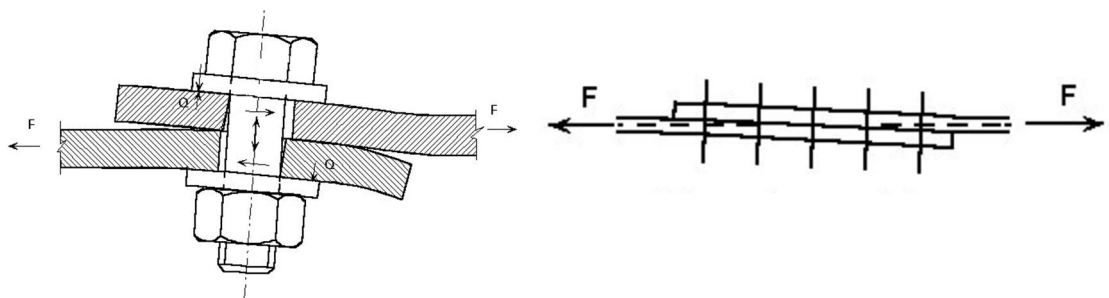


Kuva 4-3. Komponenttien muodostaminen yksileikkeisessä liitoksessa vaihe vaiheelta.



Kuva 4-4. Yksileikkeisen ruuvien ja reunapuristusjäykkyyden yhdistetty jäykkyystekijä.

Kuvissa 4-3 ja 4-4 k_{11} kuvaa kaavan (3.3) mukaista ruuvien leikkausjäykkyyttä sekä k_{12} kuvaa kaavan (3.4) mukaista reunapuristusjäykkyyttä. Kuvassa 4-4 näytetään sitä, kuinka monta komponenttia k_{12} ja k_{11} on yhdistetty kyseiseen kokonaisjäykkyysskomponenttiin k_{fi} . Komponentissa k_{fi} , f kuvaa laippaa (flange) ja i kuvaa kyseistä laipan ruuvia. Kuva ei kerro onko komponentit yhdistetty sarjaan- vai rinnankytkennällä.



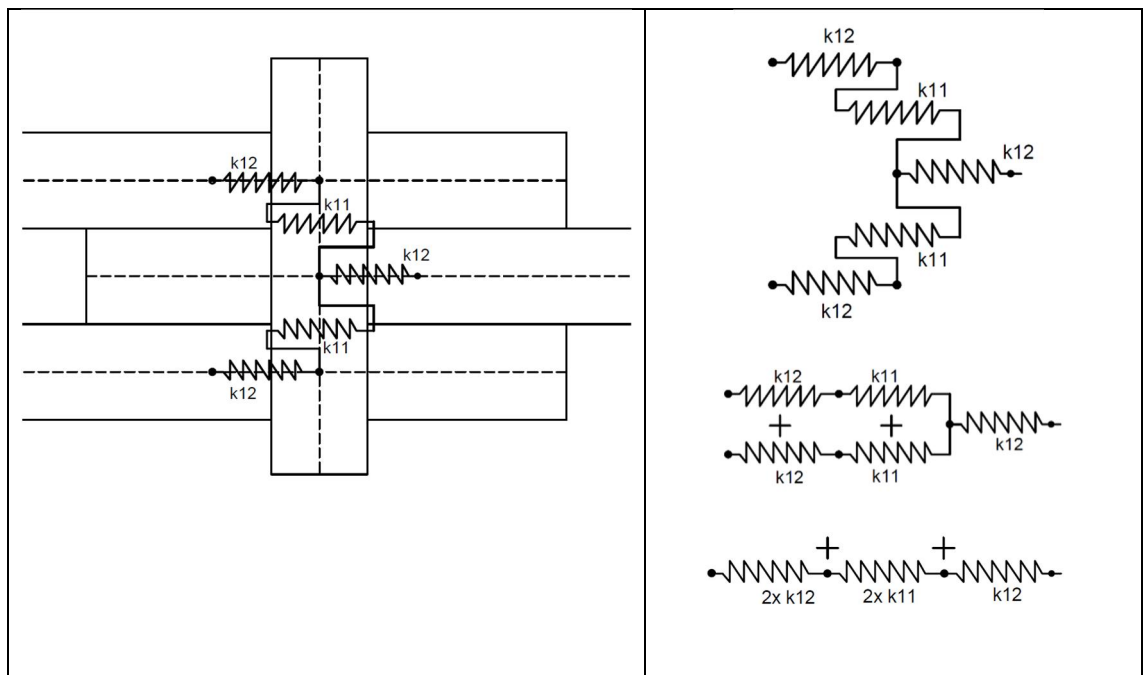
Kuva 4-5. Yksileikkeisen liitoksen epäkeskeisyyden vaikutus. [9, 30]

Todellisuudessa yksileikkeisessä liitoksessa tapahtuu myös tason kiertymistä jossain määrin. Kuvassa 4-5 esitetään yksittäisen ja useamman rivin muodonmuutoksia voiman epäkeskeisyydestä [9, 30] johtuen. Tästä kohtaa saatua tulosta voidaan pitää jossain määrin virheellisenä, kun jouset eivät ota huomioon muuta kuin aksiaalisia voimia. Virhelähde

selkeästi pienenee, kun ruuvien määrä voiman vaikutussuunnassa kasvaa. Yksileikkeistä liitosta käytetään tässä tutkimuksessa pelkästään laippalevyjen kiinnitykseen. Tässä tutkimuksessa virhelähde pienenee vielä selkeämmin, kun tutkitaan kokonaista profiilia ja heikomman suunnan taivutus on jäykistetty profiilin uumalla.

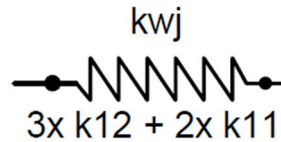
Siirryttäessä kaksileikkeiseen liitokseen, joudutaan jo soveltamaan tutkimuksessa [12] käytettyä liitostapaa. Kaksileikkeistä liitosta voidaan pitää liitosgeometria luotettavana, kuin yksileikkeistä. Liitokseen ei synny epäkeskeisyyttä liitosta kuormitettaessa. Kuvassa 4-6 vasemmalla näytetään tutkimuksesta [12] sovellettua liitosmallia. Jouset ovat peilattu pystysuunnassa keskimmäisen levyn suhteen.

Kuvassa 4-6 oikealla ylhäällä on esitetty jousimalli pelkästään, joka on oikealla keskellä sitten havainnollistamisen vuoksi avattu sarjaan- ja rinnankytkennän näyttämiseksi peräkkäin. Tästä pystytään samat jäykkyydet summaamaan ensin yhteen rinnankytkentäkaavan (3.2) mukaisesti. Kuvassa oikealla alhaalla näytetään kertaalleen summattu jousisysteemi.



Kuva 4-6. Komponenttien muodostaminen kaksileikkeisessä liitoksessa vaihe vaiheelta.

Kertaalleen summattua jousisysteemiä joudutaan vielä yhdistelemään kertaalleen päästäksemme mahdollisimman yksinkertaiseen lopputulokseen. Toisella kertaa hyödynnetään sarjaan kytkennän laskukaavaa (3.1). Näin ollen päästään kuvan 4-7 mukaiseen jouseen kokonaisjäykkyysskomponenttiin kwj kaksileikkeisen liitososan osalta, jossa kwj kuvaa uuman liitososan jäykkyyttä kussakin reiässä. Jäykkyystekijässä kwj w kuvaa uumaa (web) ja j kuvaa kyseisen uuman ruuvien kohtaa.

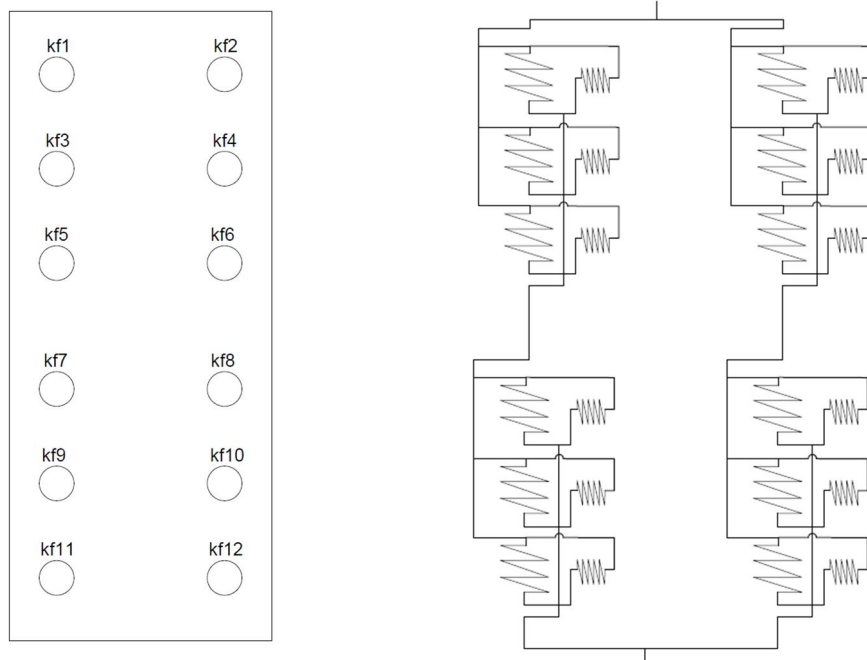


Kuva 4-7. Kaksileikkeisen ruuvin ja reunapuristusjäykkyyden yhdistetty jäykkyystekijä.

4.2.2 Liitososan 2D-jousimallin muodostaminen

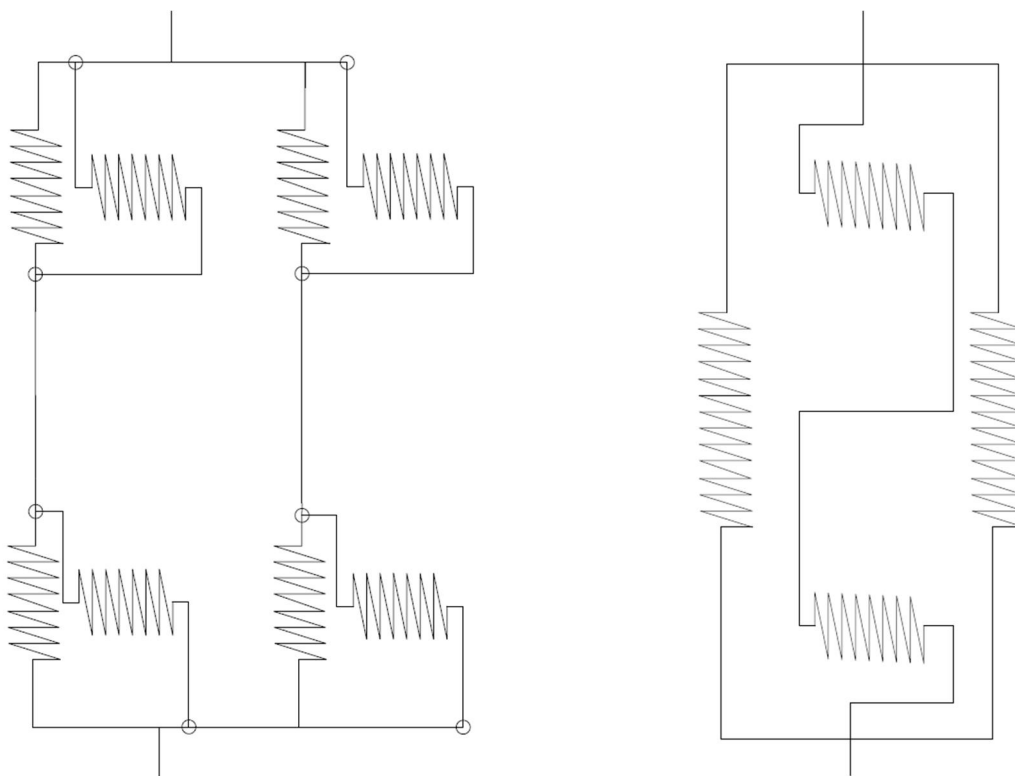
Liitoksen yksittäisen osan jousimallia voidaan kuvata yksinkertaistetulla 2D menetelmällä. Seuraavissa kuvissa jousimallia on kuvattu jokaisen ruuvin kohdalla olevalla jousella. Jousi sisältää jo kuitenkin laippalevyn ja laipan reunapuristusjäykkyyden sekä ruuvin leikkausjäykkyyden. Nämä kolme jäykkyyttä yhdistetään riippuen liitososasta yksija kaksileikkeisessä liitososassa kuten luvussa 4.2.1 on näytetty.

Kuvassa 4-8 esitetyissä rakennemallissa jouset *kf1-kf12* kuvaavat kunkin reiän kohdalla olevaa jäykkyyskomponenttia. Kuten lujuutta laskettaessa reunapuristuskomponentti sekä ruuvin leikkauskomponentti voidaan jakaa toisistaan riippumattomiin pysty- ja vaakasuuntaisiin komponentteihin [10, 12, 13]. Kuvassa 4-8 oikealla puolella jokainen reiän *kf1-kf12* jäykkyyskomponentti on jaettu pysty- ja vaakasuuntaisiin komponentteihin. Tässä esitetty malli on tarkin mahdollinen, mutta sitä pystyy yksinkertaistamaan ilman, että siitä aiheutuu merkittävää virhettä [12].



Kuva 4-8. Laippalevyn ruuvit numeroituna sekä alkuperäinen jousimalli laipan osuudelle.

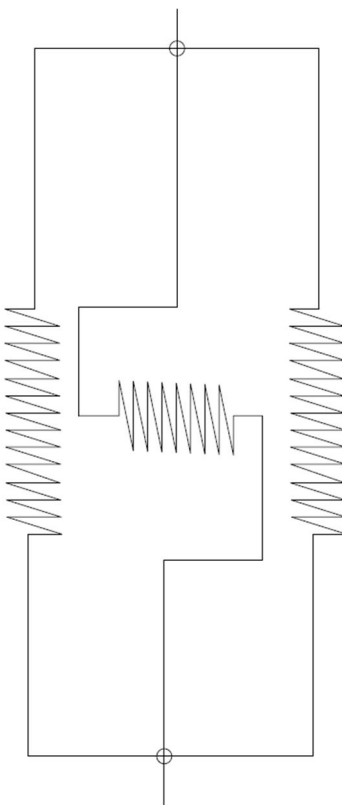
Laippalevyn jousimalli voidaan toteuttaa kuvan 4-8 mukaisesti niin, että jokaiselle ruuville on olemassa pysty- sekä vaakasuuntainen jousi. Tällä tavalla voidaan kyllä ratkaista kyseisen liitososan jäykkyys, mutta tätä on järkevä yksinkertaistaa ja yhdistää erinäisiä jousia varsinkin, kun kyseessä on ominaisuuksiltaan samanlainen komponentti jokaisen ruuvin kohdalla. Komponentin jäykkyys saattaa vaihdella riippuen reiän sijainnista liittoksessa. Seuraavassa kuvassa 4-9 esitetään jousien yhdistämistavat, jotta pystytään riittävällä tarkkuudella sekä riittävän helposti laskemaan liitososan reunapuristuskomponentin jäykkyys.



Kuva 4-9. Laippalevyn jousimallin yksinkertaistuksien vaiheita.

Kuvassa 4-9 esitetään kaksi eri vaihetta, jossa edelliseen kuvaan 4-8 verrattuna ensimmäisessä vaiheessa on yhdistetty kunkin ruuviryhmän jouset yhdeksi. X-suuntaan olevat 3 joustia on yhdistetty rinnan kytkennällä yhdeksi jouseksi kaavalla (3.2). Y-suuntaan olevat jouset ovat liitetty rinnan kytkennällä toisiinsa kaavan (3.2) mukaisesti. Kuvassa 4-9 oikealla puolella olevassa vaiheessa on peräkkäiset x-suuntaiset ruuviryhmät yhdistetty sarjaan keskenään. Kuitenkin vasemman ja oikeanpuoleinen ruuviryhmä on pidettävä erillään, jotta liitososan vahvemman suunnan kiertymisjäykkyys voidaan mallintaa. Näiden kahden jousen etäisyys on sama, kuin todellinen ruuviväli y-suunnassa. Y-suunnassa olevat jouset on yhdistetty sarjaan kytkennällä toisiinsa. Nämä jouset eivät ota muuta kuin liittoksen leikkausvoiman. Leikkausvoiman siirrosta liittoksen rajapintaan aiheuttaa lisämomenttia epäkeskeisyydestä. Tämä lisämomentti otetaan huomioon myös x-suuntaisilla jousilla. Näin ollen leikkausvoiman ottavat jouset voidaan vielä yhdistää rinnan kytkennällä toisiinsa.

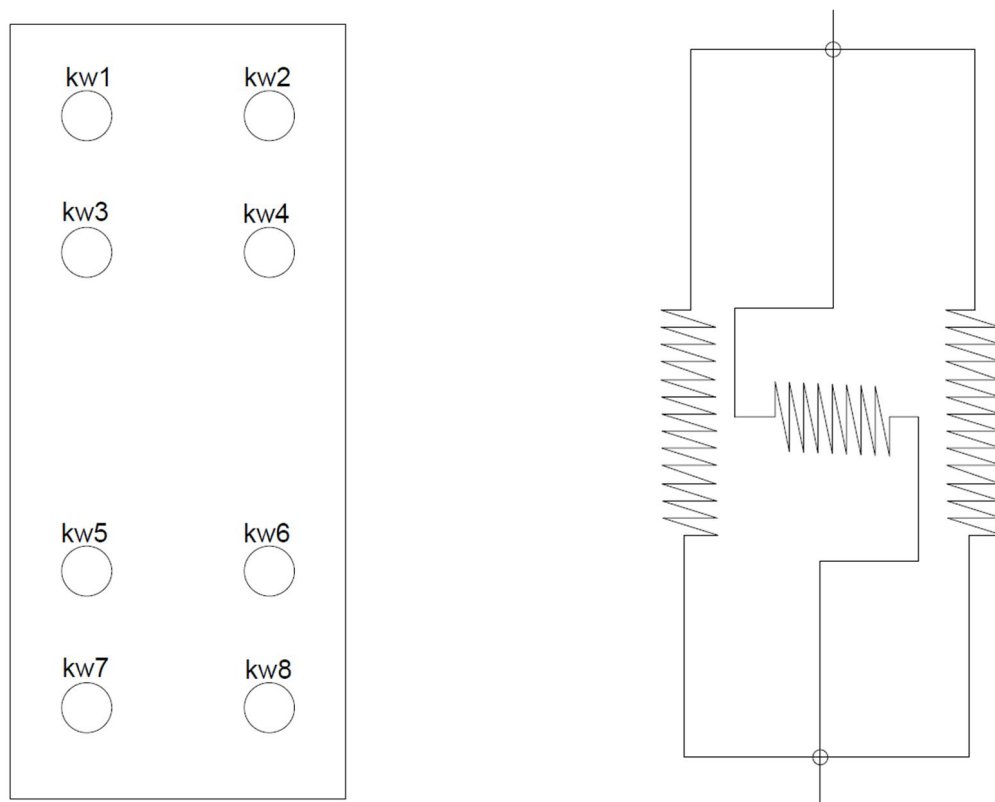
Reunapuristuskomponentilla on sama jäykkyys riippumatta leikkauksen suunnasta saman koordinaatin suhteen. Tällä komponentilla ei ole samanlaista ominaisuutta kuin vedetyillä ja puristetuilla komponenteilla [7] pilari-palkki liitoksessa. Jousisysteemissä voidaan tehdä yksinkertaistus sen suhteen, että voidaan jättää huomiotta voiman suunta kyseisessä komponentissa.



Kuva 4-10. Laippalevyn lopullinen reunapuristuksen jousimalli.

Laippalevyn lopullinen jousimalli esitetään kuvassa 4-10. Tällöin y-suuntaiset leikkauksen ottavat jouset ovat yhdistetty vielä sarjaankytkennällä yhdeksi yhtenäiseksi jouseksi. Tällä lopullisella jousimallilla päästään jo rakennemalliltaan samanlaiseen lopputulokseen kuin mitä tutkimuksessa [13] esitetään vaaka- ja pystysuuntaisesta jousisysteemistä.

Uuman liitososan jäykkyyden muodostaminen tapahtuu samalla menettelytavalla kuin aikaisemmin laipan liitososalle. Rajoituksena taivutuksessa uuman osalta pidetään tässä diplomityössä maksimissaan 2 ruuvisaraketta. Jäykkyyden määrittäminen muuttuu monimutkaisemmaksi, mikäli ruuvisarakkeet lisääntyvät. Uuman osalta voidaan ensin yhdistää x-suunnassa yhden ruuviryhmän komponentit yhdeksi rinnan kytkennällä ja vaakasuuntaista z-komponentit taas yhdeksi komponentiksi myös rinnan kytkennällä. Tämän jälkeen x-suunnassa peräkkäiset ruuviryhmät yhdistetään sarjaan kytkennällä toisiinsa. Z-akselin suuntaisiin komponentteihin käytetään edelleen sarjaan kytkennän laskusääntöä. Näiden yhdistämisten jälkeen päästään kuvan 4-11 mukaiseen lopputulokseen.



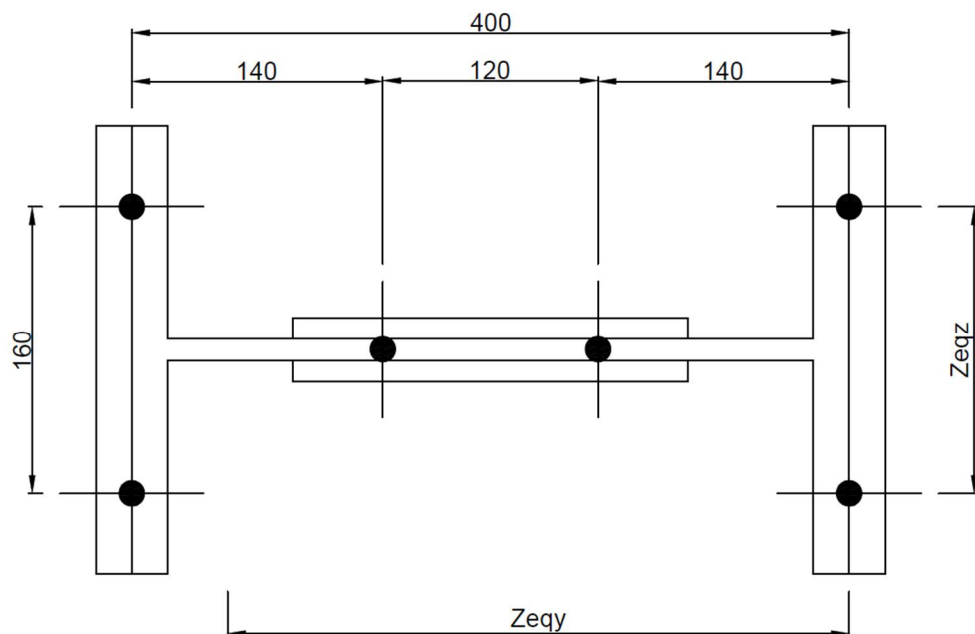
Kuva 4-11. Uumalevyn ruuvinreiät nimettynä sekä uuman lopullinen jousimalli.

4.2.3 Koko liitoksen 3D-jousimallin muodostaminen

Universaaliliitoksen täytyy pystyä ottamaan vastaan normaalivoimaa, molemman suunnan taivutusta sekä heikomman ja vahvemman suunnan leikkausvoimaa. Tästä syystä tutkittaessa jäykkyyttä joudutaan turvautumaan 3D-jousimalliin. 3D-komponenttimenetelmän jousimalleja on sovellettu seuraavasti tutkimuksista [17, 31, 32]. Jousimallin toimintaa todennetaan luvussa 5, jossa aksiaali- ja kiertymisjäykkyyden käsin laskettuja arvoja vertaillaan CBFEM-tuloksiin. Leikkausvoiman jäykkyys jätetään tässä tutkimuksessa tutkimatta. Leikkausvoiman vaikutus voidaan jättää huomiotta [13] ja sen vaikutus normaali- tai aksiaalijäykkyyteen voidaan olettaa pieneksi.

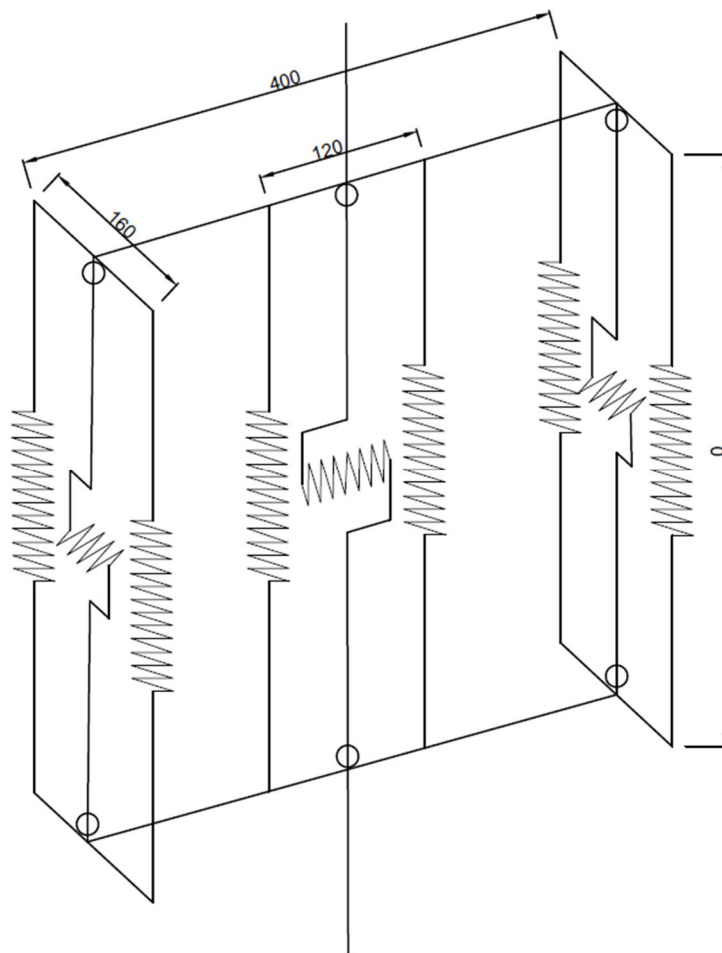
Liitoksessa määritettäessä vahvemman suunnan jäykkyyttä, liitoksen ekvivalentin momenttivarren määrittämisessä joudutaan tekemään oletuksia. Yhtenä oletuksena pidetään sitä, että puristuskeskiönä toimii liitoksen toinen laippaliitos. Todennäköisesti oletus poikkeaa jonkin verran todellisuudesta. Puristuskeskiö voi olla riippuen uuman ruuvien jäykkyyksistä verrattuna laipan ruuvien jäykkyyksiin jossain uuman reunimmaisen ruuvirivin ja laipan ruuvien välillä. Eurokoodissa [10] päätylevylitoksessa puristuskeskiön ajatellaan olevan palkin alalaipan kohdalla, joten lähdetään tässäkin työssä olettamaan sen olevan profiilin puristetussa laipassa. Vedetyllä puolella ekvivalentti momenttivarren sijoittuu riippuen jäykkyyksistä jonnekin laipan ja uuman ruuvien välimaastoon. Tämä etäisyys Z_{eqy} on havainnollistettu kuvassa 4-12.

Heikomman suunnan jäykkyyttä tutkittaessa ekvivalenttia momenttivartta voidaan pitää ruuvisarakkeiden välistä etäisyyttä. Toinen mahdollinen vaihtoehto on ottaa huomioon uuman jäykkyys ja näin ollen ekvivalentti momenttivarsi voi sijoittua johonkin lähemmäs uumaa kuin vedetty ruuvirivi. Todennäköisin momenttivarsi Z_{eqz} näytetään kuvassa 4-12. Todellinen momenttivarsi lasketaan myöhemmin kahdella eri tavalla ja vertaillaan CBFEM laskentaan.



Kuva 4-12. 3D-jousimalli päältä päin.

Lopullisen kolmiulotteisen rakennemallin kuvaus tälle kyseiselle liitokselle on näytetty kuvassa 4-13. Kyseisessä kuvassa on näytetty mahdollisimman yksinkertainen liitoksen rakennemalli, joka kuitenkin pystyy ottamaan vastaan normaalivoimaa, leikkausvoimaa sekä vahvemman ja heikomman suunnan taivutusta. Alla olevassa kuvassa 4-13 on näytetty todelliset mitat jousien sijainneille sekä havainnollistettu rakennemallin sijaintia syvyys suunnassa. Alkutilanteessa jousimallin etäisyys syvyys suunnassa on äärettömän pieni eli lähes 0.



Kuva 4-13. Liitoksen 3D-jousimalli mitoilla esitettynä.

4.3 Raollisen liitoksen alkujäykkyyden käsinlaskenta

Liitoksesta lasketaan alkujäykkyys, johon käytetään seuraavia kuormitustapauksia: normaalivoima, heikomman suunnan taivutus sekä vahvemman suunnan taivutus. Tämä siitä syystä, että CBFEM laskenta on varmistettu samoille liitosvoimille ja käsin laskennasta saatuja tuloksia pystytään helposti ja luotettavasti vertailemaan CBFEM laskentaan. Laskennassa ei pystytä yksilöimään kunkin jäykkyystekijän arvoa, vaan pelkästään koko liitoksen kiertymis- ja aksiaalijäykkyyttä [28]. Näin ollen tuloksista täytyy arvioida sitä, kuinka suuren osan jäykkyydestä reunapuristuskomponentti tuo liitokseen sekä onko tulokset oikeansuuruisia ja suuntaisia.

Laipan osuudelta lasketaan jäykkyys jokaiselle reiälle erikseen. Y-suuntaan olevat komponentit ovat jokaisessa reiässä samat. X-suunnassa taas joudutaan laskemaan yhden ruuviryhmän jokaisen reiän komponentti erikseen. Liitoksen symmetrian vuoksi samoja arvoja voidaan käyttää jokaiselle ruuviryhmälle. Kuvassa 4-14 näytetään lasketut jäykkyydet laipan yhdelle ruuviryhmälle.

Jäykkyystekijän k_{f1x} määrittelyyn tarvittavat tiedot, ensimmäisenä lasketaan laipan levyn reunapuristusjäykkyys k_{f1} kohdalla:

- reunaetäisyys voiman suunnassa: $e_b = 60mm$
- ruuviväli voiman suunnassa: $p_d = 90mm$
- M16 ruuvin nimellishalkaisija: $d_{M16} = 16mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_{fp} / 16; 2.5]$
- laippalevyn jäykkyystekijä: $k_{fp1bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 3,021mm$

Seuraavana on laskettu profiilin laipan reunapuristusjäykkyys, siihen tarvittavia tietoja ovat:

- reunaetäisyys voiman suunnassa: $e_b = 235mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_f / 16; 2.5]$
- laipan jäykkyystekijä: $k_{f1bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 3,399mm$

Viimeisenä osana x-suunnassa reiän k_{f1} kohdalla lasketaan ruuvin leikkausjäykkyys, siihen tarvittavia tietoja ovat:

- 8.8 ruuvin murtolujuus: $f_{ub} = 800MPa$
- ruuvin leikkausjäykkyys: $k_{fb} = (16d^2 f_{ub}) / (E d_{M16}) = 3,429mm$

Reiän k_{f1} kokonaisjäykkyys x-suunnassa on edellä laskettujen jäykkyyksien sarjaankyt-kentä:

- jäykkyys k_{f1x} $k_{f1x} = 1 / (1 / k_{fp1bbx} + 1 / k_{f1bbx} + 1 / k_{fb})$
 $= 1,091mm$

X-suunnassa loput jäykkyydet on laskettu samalla tavalla. Ainoana erona toimii laippalevyssä ja laipassa oleva reunaetäisyys levyn tai profiilin vapaaseen reunaan voiman suunnassa. Y-suunnan jäykkyydet ovat lähtötiedoltaan jokaisen reiän kohdalla samanlaiset. Mikäli laipassa on useampi ruuvisarake kuin kaksi, niin joudutaan y-suunnan jäykkyyksiä laskemaan useampi, mutta tämä tarkastelu jätetään tässä diplomityössä pois.

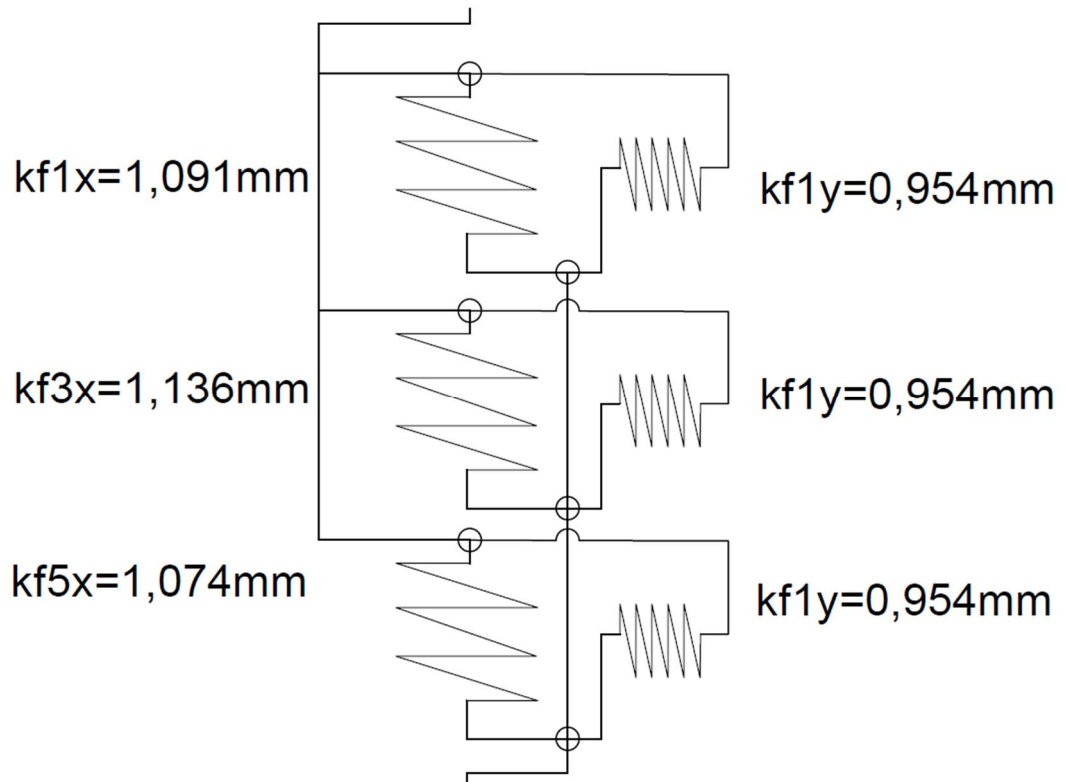
Y-suunnan jäykkyyden k_{f1y} määrittelyssä tarvittavat tiedot laippalevyn reunapuristusjäykkyyden osalta:

- reunaetäisyys voiman suunnassa: $e_b = 45mm$

- ruuviväli voiman suunnassa: $p_d = 160\text{mm}$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_{fp} / 16; 2.5]$
- laippalevyn jäykkyystekijä: $k_{fp1bby} = 24k_b k_t d f_u / E = 2,644\text{mm}$

Laipan osuudella on sama reunapuristusjäykkyys, koska ainevahvuus, reunaetäisyys ja ruuviväli ovat samoja. Ruuvien leikkausjäykkyys on sama riippumatta suunnasta. Y-suunnan kokonaisjäykkyys ruuvireiässä:

$$\text{– jäykkyys } k_{f1y} \quad k_{f1y} = 1 / (1/k_{fp1bby} + 1/k_{f1bby} + 1/k_{fb}) = 0,954\text{mm}$$



Kuva 4-14. Laipan yhden ruuviryhmän jäykkyydet x- ja y-suunnassa.

Kuvan 4-14 tiedot voidaan yhdistää nyt luvun 4.2.2 mukaisesti kattamaan koko liitososan jäykkyyttä. X-suuntaiset jouset yhdistetään rinnan kytkennällä kaavalla (3.2) ja y-suuntaan vaikuttavat jouset yhdistetään rinnan kytkennällä kaavalla (3.2). X-suunnan jousien yhdistetty jäykkyys on:

$$\text{– } k_{fx0.5} = k_{f1x} + k_{f3x} + k_{f5x} = 3,301\text{mm}$$

Y-suunnan yhdistetty jäykkyys:

$$-k_{fy0.25} = 3k_{f1y} = 2,862mm$$

Näin saadaan ruuviryhmä yhdistettyä yhdeksi jäykkyydeksi. X-suunnassa täytyy liitoksen eri puolilla olevat osat yhdistää sarjaan kytkennällä. Y-suunnan komponentit yhdistetään sarjaan kytkennällä. X-suuntaisten ruuviryhmien yhteinen jäykkyys on siis:

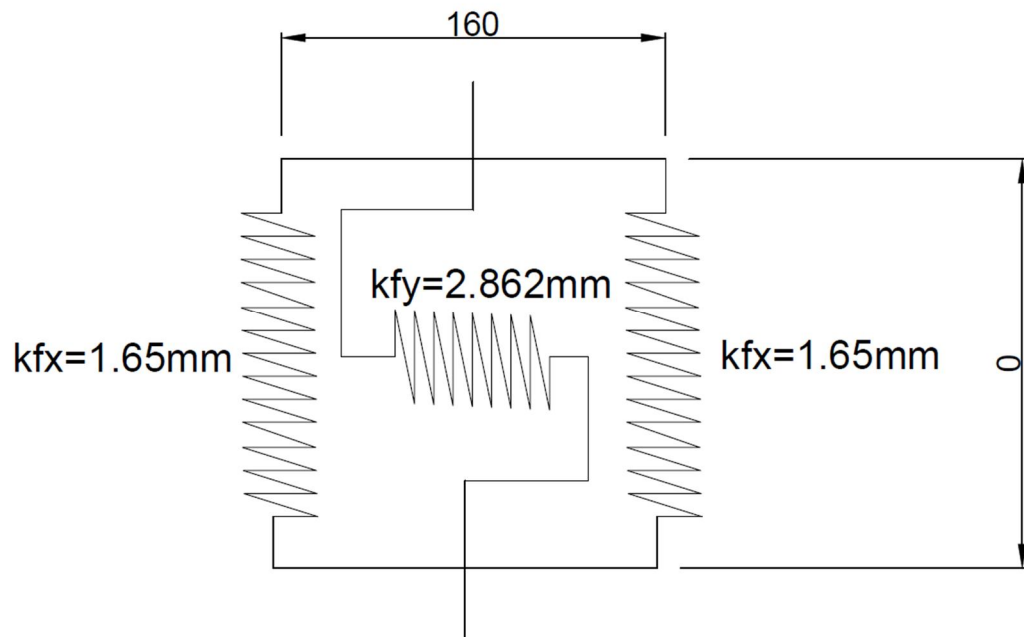
$$-k_{fx} = 1 / (1 / k_{fx0.5} + 1 / k_{fx0.5}) = 1,65mm$$

Y-suunnassa suoritetaan ensin rinnan ja sitten sarjaankytkentä:

$$-k_{fy0.5} = 2k_{fy0.25} = 5.724mm$$

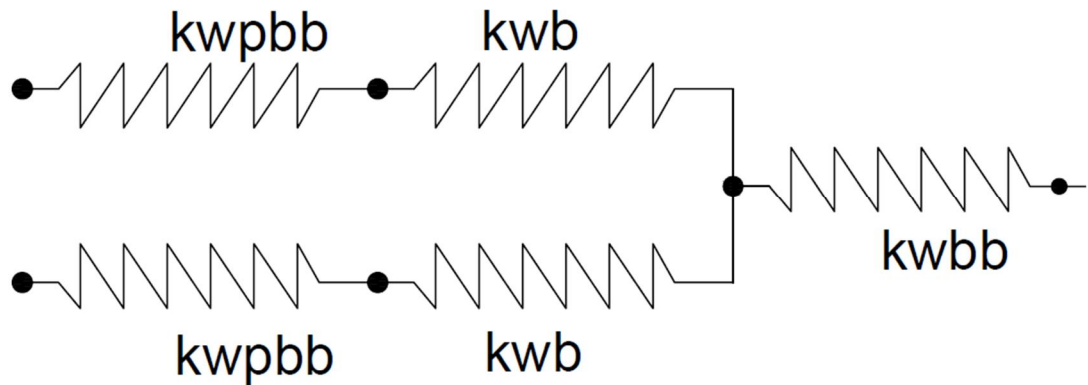
$$-k_{fy} = 1 / (1 / k_{fy0.5} + 1 / k_{fy0.5}) = 2,862mm$$

Laippalevyn lopulliseksi rakennemalliksi ja sen jäykkyydeksi saadaan kuvassa 4-14 esitetty ratkaisu.



Kuva 4-15. Laippalevyn jäykkyyden tulokset ja rakennemallin geometria.

Uuman osuutta laskettaessa laskentamenetelmät ovat samat mitä aikaisemmin. Uuman ruuvien kaksileikkeisyys tuo laskentaan oman lisänsä, joka esitetään seuraavaksi.



Kuva 4-16. kaksileikkeisen liitoksen jäykkyystekijät.

Ensimmäisenä on laskettu reiän numero $kw1$ z-suunnan komponentti. Tätä samaa z-suunnan jäykkyyttä voidaan käyttää jokaisen reiän kohdalla. Ensimmäisenä lasketaan uumalevyn reunapuristusjäykkyys:

- uumalevyn reunaetäisyys z-suunnassa: $e_b = 50mm$
- ruuviväli z-suunnassa: $p_b = 120mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_{wp} / 16; 2.5]$
- uumalevyn jäykkyystekijä: $k_{wp1bbz} = 24k_b k_t d f_u / E = 1,662mm$

Samoin täytyy laskea myös uuman reunapuristusjäykkyys z-suunnassa:

- uuman reunaetäisyys z-suunnassa: $e_b = 140mm$
- ruuviväli z-suunnassa: $p_b = 120mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_w / 16; 2.5]$
- uuman jäykkyystekijä: $k_{w1bbz} = 24k_b k_t d f_u / E = 3,777mm$

Ruuvien leikkausjäykkyys yhtä leikettä kohti on seuraavaa:

- 8.8 ruuvien murtolujuus: $f_{ub} = 800MPa$
- ruuvien leikkausjäykkyys: $k_{fb} = (16d^2 f_{ub}) / (Ed_{M16}) = 3,429mm$

X-akselin suunnassa joudutaan laskemaan uuman ja uumalevyn reunapuristusjäykkyys kahdessa eri reiässä. Nämä reiät ovat $kw1$ ja $kw3$. Samoja jäykkyyksiä voidaan liitoksen symmetrian takia käyttää peilikuvana molemmin puolin liitosta.

Uumalevyn reunapuristusjäykkyys reiässä $kw1$:

- uumalevyn reunaetäisyys z-suunnassa: $e_b = 60mm$
- ruuviväli z-suunnassa: $p_b = 90mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_{wp} / 16; 2.5]$
- uumalevyn jäykkyystekijä: $k_{wp1bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 1,813mm$

Uuman reunapuristusjäykkyys reiässä $kw1$:

- uuman reunaetäisyys z-suunnassa: $e_b = 190mm$
- ruuviväli z-suunnassa: $p_b = 90mm$
- apusuure: $k_b = \min[0.25e_b / d + 0.5; 0.25p_d / d + 0.375; 1.25]$
- apusuure: $k_t = \min[1.5t_w / 16; 2.5]$
- uuman jäykkyystekijä: $k_{w1bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 2,039mm$

Samoin lasketaan reiän $kw3$ jäykkyystekijä:

- uumalevyn jäykkyystekijä: $k_{wp3bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 2,039mm$
- uuman jäykkyystekijä: $k_{w3bbx} = 24k_b k_t d f_u / E = 2,039mm$

Näistä lasketuista arvoista yhdistetään kuvassa 4-16 näytetyllä tavalla yksi yhteinen jäykkyystekijä kullekin reiälle sekä koordinaatin suunnalle. Z-suunnassa ensimmäisenä yhdistetään rinnan kytkennällä uumalevyjen reunapuristusjäykkyydet (k_{wpbb}) ja ruuvien leikkausjäykkyydet (k_{wb}):

- levyjen osittain yhdistetty jäykkyys: $k_{wp1z0.5} = k_{wp1bbz} + k_{wp1bbz} = 3,324mm$
- ruuvien osittain yhdistetty jäykkyys: $k_{wbz0.5} = k_{wb} + k_{wb} = 6,857mm$
- z-suunnan kokonaisjäykkyys:

$$k_{w1z} = 1 / (1 / k_{wp1z0.5} + 1 / k_{wbz0.5} + 1 / k_{w1bbz}) = 1,406mm$$

X-suunnan reikien jäykkyyksille joudutaan molemmille laskemaan oma jäykkyys. Ruuvien leikkausjäykkyytenä voidaan käyttää samaa arvoa ($k_{wbz0.5}$) kaikissa kohdissa. Ensimmäisen $kw1x$ jäykkyys on:

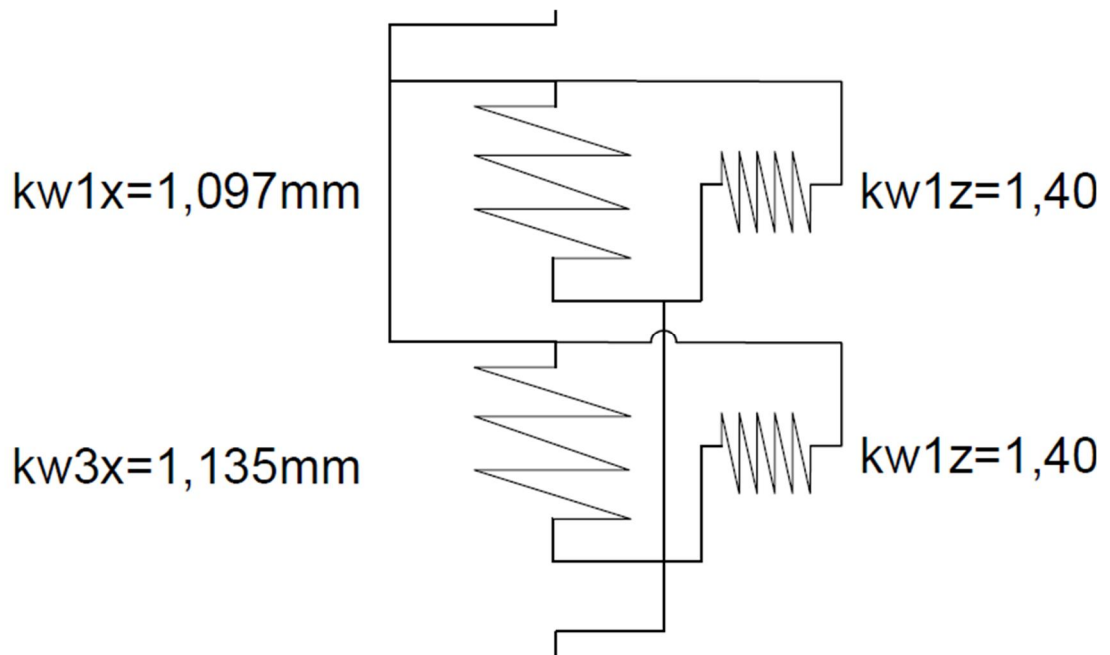
- levyjen osittain yhdistetty jäykkyys: $k_{wp1x0.5} = k_{wp1bbx} + k_{wp1bbx} = 3,626mm$
- x-suunnan kokonaisjäykkyys:

$$k_{w1x} = 1 / (1 / k_{wp1x0.5} + 1 / k_{wbz0.5} + 1 / k_{w1bbx}) = 1,097mm$$

Uumassa joudutaan jäykkyys määrittämään toisellekin ruuvireiälle. Seuraavassa on näytetty reiän $kw3$ jäykkyyden määrittäminen:

- levyjen osittain yhdistetty jäykkyys: $k_{wp3x0.5} = k_{wp3bbx} + k_{wp3bbx} = 4,079mm$
- x-suunnan kokonaisjäykkyys:

$$k_{w3x} = 1 / (1 / k_{wp3x0.5} + 1 / k_{wbz0.5} + 1 / k_{w3bbx}) = 1,135mm$$



Kuva 4-17. Uuman yhden neljänneksen reikien jäykkyydet.

Kuvassa 4-17 esitetty yhden ruuviryhmän kuvausta yksinkertaistetaan samalla periaatteella kuin mitä laipassa. Ensimmäisen yhdistetään x-suunnassa ruuvireiät $kw1$ ja $kw3$ toisiinsa rinnan kytkennällä.

- yhden ruuviryhmän jäykkyys: $k_{wx0.5} = k_{w1x} + k_{w3x} = 2,231mm$

Tämän jälkeen yhdistetään x- suunnassa eri puolilla liitosta olevat symmetriset jouset toisiinsa sarjaan kytkennällä.

- ruuvijonon kokonaisjäykkyys: $k_{wx} = 1 / (1 / k_{wx0.5} + 1 / k_{wx0.5}) = 1,116mm$

Z-suunnassa olevat jouset joudutaan yhdistämään useampaan kertaan. Ensin vierekkäiset jouset yhdistetään rinnan kytkennällä toisiinsa.

– yhden ruuviryhmän jäykkyys: $k_{wz0.25} = k_{w1z} + k_{w1z} = 2,811mm$

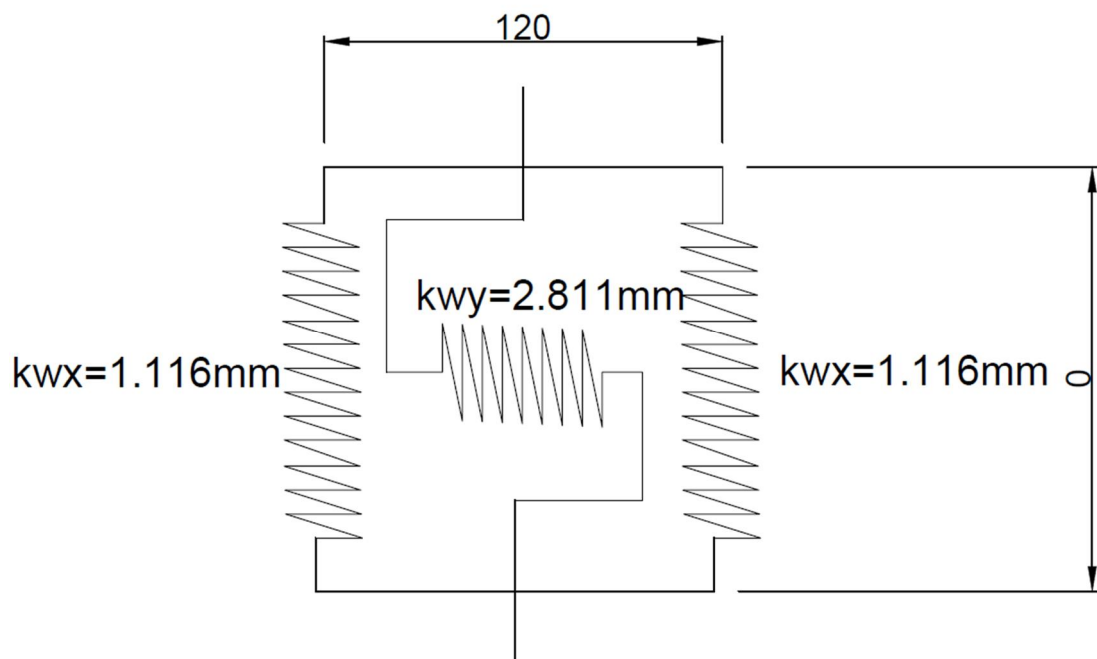
Tämän jälkeen yhdistetään samalla puolella liitosta olevat osat rinnan kytkennällä.

– liitoksen puolikkaan jäykkyys: $k_{wz0.5} = k_{wz0.25} + k_{wz0.25} = 5,622mm$

Viimeisenä yhdistetään eri puolilla liitosta olevat jäykkyydet toisiinsa sarjaan kytkennällä.

– leikkausjäykkyyden kokonaisjäykkyys:

$$k_{wz} = 1 / (1 / k_{wz0.5} + 1 / k_{wz0.5}) = 2,811mm$$



Kuva 4-18. Uuman ja uumalevyn lopullinen jäykkyystekijä.

4.3.1 Normaalivoima N

Normaalivoimalle lasketaan useammalle erilaiselle ruuviryhmittelyllä aksiaalijäykkyys. Laskennan yksityiskohtaiset eritelmät on esitetty liitteessä A. Alla olevassa taulukossa 1 luetteloituna kaksileikkeiselle liitokselle erilaiset alkujäykkyydet. Alkujäykkyydet on laskettu hyödyntämällä luvussa 4.3 laskettuja jäykkyyksiä. Liitoksen alkujäykkyys määritellään eurokoodin [7] mukaisesti. Liitoksessa riveillä tarkoitetaan liitoksen eri puolilla olevaa yhteenlaskettua rivimäärää ja sarakkeille pystysuunnassa olevia ruuvimääriä. Jäykkyyden yksikkönä on käytetty MN/m, jolloin saadaan tuloksia vertailua suoraan CBFEM tuloksiin. Kaksileikkeistä liitosta ei voitu yksinkertaistaa liikaa siitä syystä, että CBFEM laskenta ei suostunut laskemaan yksittäisten ruuvien tilannetta liitoksen ollessa mekanismi.

	aksiaali alkujäykkyys [MN/m]
2 riviä ja 2 saraketta	230,37
2 riviä ja 3 saraketta	345,56
4 riviä ja 1 sarake	234,36
4 riviä ja 2 saraketta	468,72
4 riviä ja 3 saraketta	703,08

Taulukko 1. Alkujäykkyydet kaksileikkeiselle liitokselle.

Yksileikkeinen liitos on laskettu myös pelkästään normaalivoimalle. Tulokset nähdään taulukosta 2. Alkujäykkyydet ovat laskettu muutamalle erilaiselle ruuvimäärälle ja jaottelulle. Pelkästään yksileikkeistä yhtä ruuvia ei ole tutkittu, vaan yksileikkeistä liitosta osana universaaliliitosta, jolloin liitoksen kuuluvat pelkästään laippalevyt. Laipoissa ruuvien määrä ja jaottelua on muutettu.

	aksiaali alkujäykkyys [MN/m]
laipoissa 2 riviä ja 2 saraketta	433,86
laipoissa 4 riviä ja 2 saraketta	909,3
laipoissa 6 riviä ja 2 sarake	1386

Taulukko 2. Alkujäykkyydet kaksileikkeiselle liitokselle.

Erilaisten yhdistelmien laskeminen auttaa haarukoimaan mahdollisia virhelähteitä verrattaessa tuloksia CBFEM laskentaan. Normaalivoiman tapauksessa on laskettu myös koko liitoksen aksiaalijäykkyys. Koko liitoksen aksiaalijäykkyydeksi on luvun 4.1 liitoksella saatu 1854,7 MN/m.

4.3.2 Vahvemman suunnan momentti M_y

Lasketaan ensin vahvemman suunnan momentille kiertymäjäykkyys pelkästään laipan ruuvien osalta. Tämä siitä syystä, että ekvivalentin momenttivarren määrittäminen on yksinkertaisempaa. Ekvivalentin momenttivarren puristuskomponentti sijaitsee puristetun laipan kohdalla [7]. Vedetty puoli sijaitsee vedetyn laipan kohdalla. Näin ollen kiertymäjäykkyydeksi pelkillä laipan ruuveilla on saatu 55,46 MNm.

Vahvemman suunnan taivutuksessa on myös laskettu pelkästään uuman ruuvien osuudet. Puristus- ja vetokeskiön sijainti on yksiselitteisesti ruuvisarakkeiden kohdalla. Näin ollen kiertymäjäykkyydeksi on saatu 1,69 MNm. Viimeisenä on vahvemman suunnan momenttia tutkittaessa laskettu koko liitoksen kiertymäjäykkyys. Ekvivalentin momenttivarren etäisyys on laskettu kahdella tapaa. Eurokoodin [7] mukaan, jossa puristuskeskiö sijaitsee laipassa ja kaikki muut ruuvisarakkeet ovat vedettyjä. Toisena vaihtoehtona momenttivarren määrittämiselle on olettaa neutraaliakseli keskelle liitosta ja määrittää jäykkyyksien suhteen puristus- ja vetokeskiön sijainti. Eri menetelmien tarkemmat laskut on esitetty liitteessä A. Alla olevassa taulukossa 3 on näytetty eurokoodilla ja perinteisellä mekaniikan laskusääntöjen avulla saatujen jäykkyyksien tulokset.

	kiertymäjäykkyys käsin laskennalla [MNm]
EC3	52,27
Jäykkyysien suhteen	52,86

Taulukko 3. Koko liitoksen alkukiertymäjäykkyys vahvempaan suuntaan.

Eri tavoin laskemalla saadaan lähes samansuuruiset alkujäykkyyden arvot. Myöhemmin luvussa 5.4 tuloksia vertaillaan CBFEM laskentaan, jolloin nähdään kummalla menetelmällä päästään lähemmäksi totuutta.

4.3.3 Heikomman suunnan momentti M_z

Heikommassa suunnassa ekvivalentin momenttivarren määrittäminen tehdään kahdella eri tavalla. Ensimmäisellä tavalla painopiste määritetään neutraaliakselin suhteen, jolloin ei oteta huomioon ollenkaan uuman jäykkyyttä. Näin ollen veto- ja puristuskeskiö sijoittuu täysin laipan ruuvisarakkeiden kohdalle. Toisena vaihtoehtona on laskea eurokoodin tavalla ja ottaa huomioon myös uuman ruuvisarakkeet, jolloin ekvivalentti momenttivarsi pienenee, mutta vuorostaan ekvivalentti jäykkyys kasvaa.

	kiertymäjäykkyys käsin laskennalla [MNm]
Painopisteen suhteen uuman vaikutus huomiotta	8,87
Eurokoodin mukaan uuman vaikutus huomioitu	8,19

Taulukko 4. Koko liitoksen alkukiertymäjäykkyys heikompaan suuntaan.

Yllä olevassa taulukossa 4 huomataan, että mikäli uuman vaikutusta ei huomioida päästäisiin jäykempään ratkaisuun. Ero ei ole suuri kummallakaan laskentatavalla, todellinen ekvivalentti momenttivarsi on todennäköisesti jotain näiden kahden tapauksen väliltä.

4.3.4 Voimien yhteisvaikutus

Voimien yhteisvaikutukseen jäykkyyden osalta ei löydy kirjallisuudesta työkaluja. Alkujäykkyyttä tutkittaessa voimien toimiessa samaan aikaan niiden yhteisvaikutuksessa lasketaan kunkin voiman vaikutus erikseen ja jokaiselle komponentille saadaan oma alkujäykkyys. Normaalivoimalle saadaan aksiaalijäykkyys sekä vahvemman suunnan taivutukselle kiertymäjäykkyys y-akselin suhteen ja heikomman suunnan taivutukselle kiertymäjäykkyys z-akselin suhteen. Geometrisesti lineaariset kimmoiset jouset kuvaavat alkutilanteen jäykkyyttä hyvin. Tämä onnistuu erilaisille kuormituksille ja niiden yhdistelmille. Luvussa 5.4 lasketaan Idea Staticalla alkujäykkyydsarvot useammalle erilaiselle kuormitukselle. Tutkittaessa murtorajatilanteen siirtymiä tai jäykkyyksiä voidaan todeta, ettei eurokoodin mukainen komponenttimenetelmä anna todenmukaisia arvoja. Materiaalin plastinen käyttäytyminen jää huomioimatta kokonaan, jolloin siirtymät ja kiertymät jäävät todellisuutta huomattavasti pienemmiksi. [17]

4.3.5 Liitosluokitus jäykkyyden perusteella

Liitosluokitus voidaan suorittaa eurokoodin [7] mukaan kahdelle eri tapaukselle erikseen. Vahvemman- ja heikomman suunnan taivutukselle. Näissä tapauksissa raja-arvoa verrataan aikaisemmin laskettuihin alkukiertymäarvoihin. Seuraavassa on laskettu raja-arvot molemmille tapauksille.

Universaaliliitoksen voidaan kuvitella olevan osa isompaa rakennetta, jossa on aina sivuttaissiirtymää rajoittava jäykistysjärjestelmä. Tällöin apusuure $k_b = 8$. Kimmokerroin on rakenneteräkselle tässä jo aikaisemmin sovittu $E = 210000\text{MPa}$. Neliömomentti pilarilla vahvempaan suuntaan on $I_{by} = 407\,989\,333\text{mm}^4$ ja heikompaan suuntaan $I_{bz} = 52\,135\,173\text{mm}^4$. Pilarin pituutena voidaan pitää yleensä jäykistävien tasojen väliä eli $L_b = 6\text{m}$.

Vahvempaan suuntaan taivutukselle jäykän liitoksen raja-arvo on seuraava:

$$Raja_{jäykkä,y} = \frac{k_b EI_{by}}{L_b} = 114,2\text{MNm}$$

Vahvempaan suuntaan nimellisesti nivelellisen liitoksen raja-arvo on seuraava:

$$Raja_{nivel,y} = \frac{0,5 EI_{by}}{L_b} = 7,14\text{MNm}$$

Heikomman suunnan raja-arvot muuttuvat profiilin taivutusvastuksen pienentyessä. Heikomman suunnan taivutukselle jäykän liitoksen raja-arvo on seuraava:

$$Raja_{jäykkä,z} = \frac{k_b EI_{bz}}{L_b} = 14,6\text{MNm}$$

Heikomman suunnan taivutukselle nimellisesti nivelellisen liitoksen raja-arvo on:

$$Raja_{nivel,z} = \frac{0,5 EI_{bz}}{L_b} = 0,91\text{MNm}$$

4.4 Yhteenveto

Laskettaessa käsin liitoksen alkujäykkyyttä päästään luotettavasti hyödyntämään eurokoodin [7] ja tutkimuksissa [12, 13, 17] tutkittuja asioita, joiden avulla saadaan muodostettua luotettavasti koko liitoksen 3D- rakennemalli. Kyseiset tutkimukset ovat olleet todella laajoja, kattaen hyvin tähän työhön käytettyjä menetelmiä. Laskettaessa liitoksen lopullista toimintaa siirtymien ja kiertymien osalta täytyisi jokaiselle erilaiselle kuormitukselle määritellä mikä jousi pettää ensimmäisenä kuormituksen kasvaessa. Laskettavia tapauksia on ääretön määrä. Kullekin kuormitustapaukselle jouduttaisiin määrittämään

vielä, kuinka monta joustaa voi olla plastisoitunut, ennen kuin liitoksesta tulee mekanismi. Tässä diplomityössä ei tutkita sitä raja-arvoa, jossa kimmoisuus loppuu ja komponenttimenetelmän luotettavuus loppuu. Alkujäykkyyden määrittäminen onnistuu käsinlaskennalla hyvinkin suoraviivaisesti, kun liitosta on yksinkertaistettu tarpeeksi, eikä oteta huomioon muuta kuin reunapuristusjäykkyys ja ruuvien leikkausjäykkyys. Todellisuudessa jäykkyyteen vaikuttaa levymateriaalien aksiaalijäykkyydet, leikkausjäykkyydet sekä levyjen taivutusjäykkyydet vahvempaan ja heikompaan suuntaan.

Tässä diplomityössä luotu 3D-rakennemalli toimii hyvänä pohjana jatkotutkimuksia ajatellen. Kyseistä liitosta voidaan laajentaa kattamaan levyjen vahvemman suunnan taivutus-, leikkaus ja aksiaalijäykkyydet. Liitoksen samaa periaatetta voidaan hyödyntää myös useammalle ruuviriville tai -sarakkeelle. Tämä liitoksen laajempi tutkiminen on jätetty tästä työstä pois.

Liitokselle laskettiin myös eurokoodin [7] mukaisesti raja-arvot jäykkyydelle heikompaan sekä vahvempaan suuntaan. Vahvempaan suuntaan olevassa taivutuksessa huomataan, kuinka liitos on todellisuudessa osittain jäykkä. Laskettu alkujäykkyys on 52,86MNm ja jäykän liitoksen raja-arvo on 114,2MNm. Heikomman suunnan taivutuksessa alkujäykkyydeksi on laskettu 8,87MNm ja jäykän liitoksen raja-arvoksi saatiin 14,6MNm. Näin ollen myös heikompaan suuntaan liitos luokitellaan osittain jäykeksi liitokseksi.

5. FEM-VERTAILULASKELMAT

Vertailussa on tarkoitus käyttää Idea Statica nimistä CBFEM numeerista simulointiohjelmaa. Tämä on suhteellisen uusi tulokas markkinoilla ja näin ollen sen antamista tuloksista tämän tyyppisessä liitoksessa ei ole vielä varmuutta. Tässä ohjelmistossa on myös hyödynnetty ensimmäistä kertaa yhdistettyä komponenttimenetelmää ja FEM laskentaa [28]. Lisää tämän menetelmän teoreettisesta pohjasta luvussa 5.2. Ohjelma soveltuu tavanomaisen suunnittelijan käyttöön hyvinkin pienellä perehdytyksellä ja näin ollen soveltuu hyvin päivittäiseen käyttöön. Käyttöönotto on helppoa ja asetusten sekä reunaehdojen asettaminen on yksinkertaista. Suurimman osan reunaehdoista ja liitosgeometriasta pystytään tuomaan suoraan 3D mallinnusohjelmasta. Itse FEM asetuksiin ei tarvitsisi ohjelmistokehittäjän mielestä juurikaan puuttua [28], kunhan malli on mallinnettu oikein.

5.1 Vertailun luotettavuus

Numeerisen simuloinnin tuloksia vertaillaan aikaisemmassa diplomityössä [6] saatuihin tuloksiin. Voimajakaumaa tutkitaan raollisella universaalijatkoksella. Tarkempaan tarkasteluun tulee myös komponenttimenetelmällä luvussa 4 laskennalla saadun liitososan ja liitoksen alkujäykkyys siltä osin kuin se on mahdollista todentaa Idea Staticalla. Tämä työ rajoittuu pelkästään raolliseen liitokseen ja toimintaan.

Tutkittaessa vertailun luotettavuutta, niin lähtökohtana on saavuttaa varmistus laskentamallin soveltuvuudesta matemaattiseen malliin [33]. Tämä on osoitettu Idea Statican toimesta yhdessä useampien yliopistojen kanssa [28]. Matemaattisena mallina toimii tässä työssä komponenttimenetelmällä saadut tulokset liitososan jäykkyydestä ja voimajakaumasta. Komponenttimenetelmä teoria perustuu luvussa 3 esitettyyn teoriaan. Tutkimuksessa [6], jossa on liitoksen voimajakauma määritelty käsin laskemalla kuvaa matemaattista mallia. Voimajakauma perustuu aikaisempien tutkimusten teorioihin [6]. Ohjelmiston laskentatapaan, taustalla olevaan teoriaan tai välituloksiin ei päästä käsiksi, mutta kun varmistus ja validointi on suoritettu asianmukaisesti ohjelmiston kehittäjän puolelta, voidaan luottaa laskennallisen mallin toteuttavan hyvin fysikaalista teoriaa [33].

Mikäli nämä tässä työssä saadut jäykkyyden arvot sekä tutkimuksessa [6] saadut voimajakaumat ovat linjassa Idea Staticalla saatuihin tuloksiin, voidaan hyvin todennäköisesti pitää ohjelmaa luotettavana tämän tyyppisen liitoksen laskennassa. Näin ollen voitaisiin laajentaa laskentaa monipuolisempiin universaaliliitoksiin. Laajennus voisi tarkoittaa useampaa ruuvia rivissä tai sarakkeissa. Sekä uumassa, että laipoissa. Ollaksemme täysin varmoja tämä täytyisi varmentaa tulevaisuudessa. Mikäli huomataan, että ohjelmalla ei päästä haluttuun tulokseen, täytyy alkaa selvittää sitä mistä kyseinen virhe voisi johtua. Onko vika luodussa mallissa, ohjelmiston laskentaperiaatteessa, sillä tarkkuudella, jota

me pääsemme tutkimaan vaiko jostain aivan muusta. Mikäli virhe johtuu ohjelmistosta voi ohjelmiston kehittäjää pyytää selvittämään, onko virhettä mahdollista korjata.

5.2 CBFEM ohjelmiston teoreettinen pohja

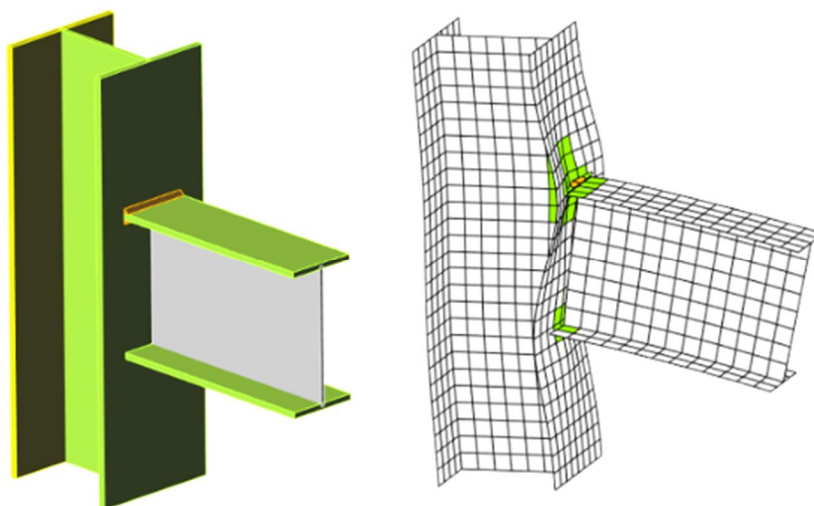
Komponenttimenetelmään perustuvan elementtimenetelmän (CBFEM) etuja ovat sen yleinen toiminta monenlaisiin liitoksiin, yksinkertainen ja nopea käyttää päivittäisessä suunnittelutyössä sekä antaa tarpeeksi kattavia tuloksia suunnittelijalle liitoksen käyttäytymisestä, jännitysjakaumista, venymistä ja kokonaisvarmuudesta. Ohjelmisto käyttää hyväkseen kimmoplastista materiaalista epälineaarista analyysia. Materiaalin lineaarisen mallin käyttö liitoksissa on todella epävarmalla puolella, näin ollen sitä ei suositella käytettäväksi. [28]

Ohjelmistolla saadaan suoritettua kahden tyyppistä analyysia. Geometrisesti lineaarista analyysia, jossa materiaali- ja kontaktimalli ovat epälineaarisia jännitysten ja venymien osalta. Toinen on ominaisarvo analyysi, jolla määritetään mahdollisten lommahdusten ja nurjahdusten syntymistä. Geometrisesti epälineaarinen analyysia ei ole toteutettu ohjelmistolla. [28]

5.2.1 Levyt

Kaikki levyt sekä profiilien laipat ja uumat ovat toteutettu kuorielementeillä. Kuorielementit koostuvat neliön muotoisista elementeistä, joissa jokaisessa nurkassa on solmupiste. Solmupisteillä on kuusi vapausastetta, kolme siirtymätermiä ja kolme kiertymistermiä. Elementtiverkon tiheys on vakiona 8 elementtiä profiilin leveys- tai korkeussuunnassa, kuten kuvassa 5-1 näytetään. Irrallisilla levyillä elementin koko on määrätty sen mukaan, että levyn korkeussuunnassa on 16 elementtiä.[28]

Kontaktipinnoissa käytetään tavanomaista sakotusmenetelmää, mikäli kontaktialueella elementin solmupiste lävistää vastakkaisen solmupisteen tai elementin. Tämä mahdollistaa erikokoisten elementtikokojen käyttämisen vierekkäisissä liitoksen osissa. Ohjelmisto automaattisesti tunnistaa lävistyksen ja jakaa kontaktivoiman viereisille solmuille. [28]



Kuva 5-1. Esimerkki kontaktipinnan syntymisestä palkin alalaipan ja pilarin laipan välille. [28]

5.2.2 Hitsit

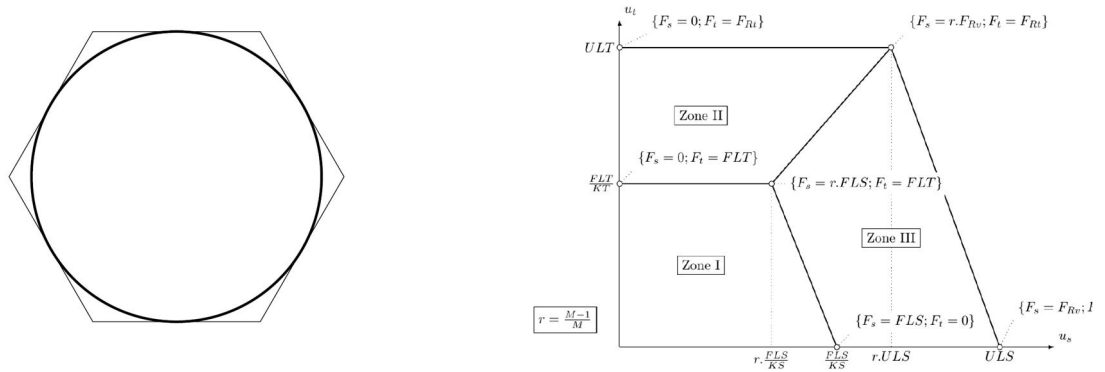
Hitsausliitoksessa kaikki voimat välitetään hitsien kautta. Hitsit on mallinnettu voima-muodonmuutos rajaehdolla, joka perustuu Lagrangian yhtälöön. Liitosta kutsutaan englanniksi multi-point constraint (MPC). Tämä liitos liittää eri levyjen elementtien solmut toisiinsa, näin ollen eri levyjen solmupisteet eivät ole suorassa kosketuksissa toisiinsa. Etuna tällä menetelmällä on yhdistää kaksi eri tiheyksistä elementtiverkkoa toisiinsa. MPC mahdollistaa hitsin epäkeskeisyyden luomisen, jolloin se kuvaa todellista hitsin a-mittaa. [28]

Hitsien tärkein tehtävä on jakaa voimat levyltä toiselle. Tämä aiheuttaa yleensä jännityspiikkejä levyjen reuna-alueille ja päätyihin. Tällä tapaa saatu tulos on hyvin varmalla puolella jännityksien suhteen. Idea Staticassa hitsit ovat mallinnettu kimmoplastisella materiaalmallilla. Tämä mahdollistaa realistisempien jännitysarvojen saannin mallista. Hitsit jakavat jännityspiikkejä niiden pituuden matkalle. Kimmoplastinen materiaalmalli mahdollistaa hitseistä saatavien tulosten suoran käytön tarkastellessa hitsin eri lujuuskomponentteja. [28]

5.2.3 Ruuvit

CBFEM pohjaisessa laskennassa ruuvit mallinnetaan riippuvaisista epälineaarisesti jousista. Vedolla oleva ruuvi kuvataan jousella, jolla on aksiaalinen alkujäykkyys, suunnittelukestävyys, myötäämisen alkupiste ja muodonmuutoskapasiteetti. Aksiaalinen alkujäykkyys on määritelty standardien [34, 35] mukaisesti. Myötäämisen kuvaaminen sekä muodonmuutoskyky perustuu siihen, että plastiset muodonmuutokset tapahtuvat pelkästään ruuvin kierteellisellä osuudella. [28]

Ruuvit välittävät vetovoiman levyille interpolaatiolinkkien avulla ruuvin varren sekä kannan ja levyn solmupisteiden välillä. Alue, jonka kautta voimat siirtyvät vastaa keskiarvoa ruuvin varren ja kuusikulmaisen ruuvin kannan alle piirretyn ympyrän halkaisijaa, kuten kuvassa 5-2 vasemmalla puolella on näytetty ympyrän halkaisija. Tämä on varmalla puolella voimien jakaantumisen kannalta, kun pinta-ala on aina pienempi kuin todellinen pinta-ala. Puristetulla puolella voimat siirtyvät pelkästään ruuvin varren ja levyn reiän kautta. Tässä interpolaatiolinkki toimii ruuvin varren ja reiän reunojen solmupisteiden välillä. Leikkausvoima voidaan siirtää mallissa tavanomaisella ruuvin reiällä jokaiseen suuntaan tai mikäli on soikioreikä niin tämä otetaan huomioon yhden suunnan vapautuksella. [28] Leikkausvoiman ja vetovoiman yhteisvaikutus on otettu huomioon mallissa suoraan eurokoodin mukaisella yhteisvaikutusdiagrammilla. Kuvassa 5-2 oikealla puolella on esimerkki eurokoodista. Tässä siis normaalivoima vähentää ruuvin leikkauskapasiteettiä ja päinvastoin. [7]



Kuva 5-2. Kuusikulmaisen ruuvin kannan sisään piirretty ympyrä sekä normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutusdiagrammi [7].

5.3 Aikaisemmat tulokset

Kahteen suuntaan taivutetulle raolliselle universaaliliitokselle [6] on tutkittu ja vertailtu valmiiksi Ansysin antamia tuloksia sekä Mathcad:llä käsin laskettuja tuloksia toisiinsa. Liitteessä B näytetään kuvaajat sekä lukuarvot taulukoituna Ansys, Mathcad sekä Idea Statica tuloksia samoilla kuormitustapauksilla. Tällä vertailulla on tarkoitus osoittaa Idea Statica ohjelmiston luotettavuus voimasuureiden laskennassa. Luvussa 5.3.1 on näytetty eri kuormitustapausten prosentuaaliset erot Idea Statican ja Mathcad:n välillä sekä Idea Statican ja Ansysin välillä.

5.3.1 Idea Statica vertailulaskenta

Ensimmäinen vertailtava kuormitustapaus on normaalivoima. Lähtökohtaisesti normaalivoiman jakautuminen universaaliliitoksessa eri liitososille on hyvin yksinkertainen asia käsin laskettaessa. Kuten kuvassa 5-3 nähdään, erot Mathcad:n ja Idea Statican välillä

ovat hyvin pienet. Eroavaisuudet löytyvät Ansysin ja Idea Statican väliltä, joista voidaan todeta, että Idea Statica on hyvin varmalla puolella. Syy miksi CBFEM pohjainen laskenta antaa korkeampia tuloksia on varmasti se, että tässä kohtaa ohjelmisto hyödyntää jossain määrin komponenttimenetelmää eli käsinlaskentaa sekä FEM laskentaa. Ansys on täysin FEM pohjainen ja ottaa huomioon kaiken mahdollisen, mikäli se on mallinnettu oikein.

Johtuen Idea Statican puutteellisuudesta tulosten tarkastelussa, niin laippa- sekä uumalevyn puristus on jouduttu laskemaan ruuveissa olevien leikkausvoimien summana. Tässä tilanteessa, kun leikkausta on vaan yhteen suuntaan, voidaan tulosta pitää hyvinkin luotettavana.

Kuormitustapaukset	Laippalevyn puristus	
<i>N</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kN</i>	%	%
200	-1,4	-1,4
400	-1,4	-1,4
600	-0,9	-0,9

Kuormitustapaukset	Laipan ruuvin leikkaus x-akseli	
<i>N</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kN</i>	%	%
200	-2,5	17,0
400	2,2	17,5
600	0,6	17,3

Uumalevyn puristus	
<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
%	%
3,3	6,9
2,5	6,0
2,8	6,3

Uuman ruuvin leikkaus x-akseli	
<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
%	%
4,0	20,0
4,7	20,8
4,4	20,5

Kuva 5-3. Normaalivoiman kuormitustapauksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

Seuraavana kuormitustapauksena on tutkittu vahvemman suunnan *My* taivutusta liitoksessa. Tässä tilanteessa laippalevyn puristusta on tutkittu Idea Statican osalta laipassa olevien ruuvien leikkausvoiman summana. Vahvempaan suuntaan taivutetussa rakenteessa laippaan tulee pääsääntöisesti pelkästään leikkausvoimaa, joten virhe siitä on hyvin pieni. Uuman ruuvin leikkausresultantin eroavaisuus käsin laskentaan on huomattavasti erilainen. Kuvasta B-7 huomataan, että käsin laskennan tulokset menevät lineaarisesti, kun taas Idea Statica ja Ansys noudattavat hyvin samanlaista käyttäytymistä voiman suuruuden muuttuessa. Tämän selityksenä voidaan pitää CBFEM-menetelmän tapaa yhdistää sekä komponenttimenetelmää sekä FEM-laskentaa. Tässä tapauksessa ohjelmisto hyödyntää selkeästi enemmän FEM- laskentaa.

Kuormitustapaukset		Laippalevyn puristus	
<i>My</i>		<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kNm</i>		%	%
125		-2,6	-3,6
250		-2,6	-3,1
375		-2,6	-3,0
500		-2,3	-2,6
625		-1,5	-1,8

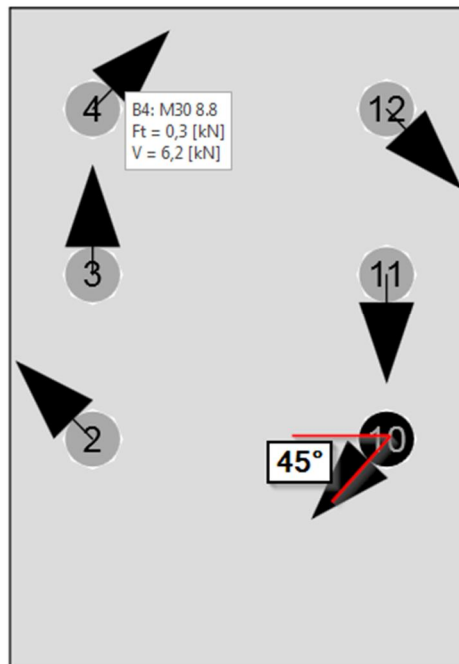
Laipan ruuvien leikkaus x-akseli		Uuman ruuvien leikkausresultantti	
<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
%	%	%	%
-3,9	12,1	-51,7	28,9
1,3	18,4	-51,2	32,6
1,4	16,5	-51,0	27,3
1,6	14,7	-50,4	24,7
1,6	13,2	-45,8	20,6

Kuva 5-4. Vahvemman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

Kolmantena kuormitustapauksena on vertailtu heikomman suunnan M_z taivutusta. Jotta tässä kuormitustapauksessa on päästy käsiksi laippalevyn vahvemman suunnan taivutukseen, on jouduttu vertailu CBFEM ohjelmistolla suorittamaan perustuen arvioon. Arvio perustuu ruuveista saatavaan komponenttivoimaan ja liitosgeometriaan. Seuraavan kuvan 5-5 mukaisesti ruuvien voimajakaumasta saadaan laskettua kauimmaisen ruuvien pystykomponentti.

$$V_b = V \cos 45^\circ,$$

jossa V_b on ruuvien leikkausvoiman x-suunnan komponentti, V on ruuvien leikkausvoiman resultantti kuvan 5-5 mukaisesti sekä 45° tulee kuvasta 5-5 arvioimalla voiman suunta mittaamalla kuvasta piirto-ohjelmalla.



Kuva 5-5 Idea Staticasta saatu ruuvien voimajakauma laipan ruuveilla heikomman suunnan taivutuksessa.

Näin ollen saadaan kaavalla 5.1 johdettua vertailukelpoinen tulos laippalevyn taivutukselle.

$$M_y = \frac{V_b I_{fb}}{y_{max}}, \quad (5.1)$$

jossa V_b on ruuvien leikkausvoiman x-suunnan komponentti, I_{fb} on ruuviryhmän neliömomentti ruuviryhmän keskeltä sekä y_{max} y-suunnan maksimietäisyys ruuviryhmän keskeltä. Tämän tulosten perusteella on saatu vertailukelpoisia tuloksia laippalevyn taivutukselle.

Laippalevyn taivutuksen osalta eri laskentatavat antavat hyvin samansuuruisia tuloksia. Virheprosentti on ainoastaan suurimmillaan n. 7% luokkaa. Laipan ruuvien leikkausresultantin suuruus Idea Statican ja käsin laskennan välillä voidaan pitää samana. Ansys puolestaan antaa tuloksiksi suuruusluokaltaan 1/5 pienempiä tuloksia verrattuna kahteen muuhun laskentatapaan.

Kuormitustapaukset	Laippalevyn taivutus	
<i>Mz</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kNm</i>	%	%
7,5	2,6	5,4
15	5,3	6,8
22,5	6,3	6,3
29,9	6,0	6,0
37,4	5,9	6,5
44,9	5,8	6,3

Laipan ruuvien leikkausresultantti	
<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
%	%
5,0	26,0
-2,3	15,5
0,0	18,8
1,2	15,0
-1,3	17,0
-0,3	18,4

Kuva 5-6. Heikomman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

Neljäntenä vertailuna on tutkittu molempiin suuntiin tapahtuvaa taivutusta. Tuloksista on saatu suoraan ruuvien voimien resultantit, jotka laipan osalta ovat hyvinkin samat käsin laskennan kanssa, kun taas Ansys antaa selvästi pienempiä tuloksia. Uuman ruuvien osalta käsin laskenta on reilusti varmallalla puolella ollen yli 2 kertaa isompia kuin Idea Staticalla saadut tulokset. Idea Statica ja Ansys ovat kuvan B-12 mukaisesti samansuuntaiset mutta suuruudelta erilaiset. Idea Statica on vielä selvästi varmemmalla puolella voimien suhteen. Uuman ruuvien leikkausresultantin osalta käsin laskenta on selkeästi eri suuruusluokkaa mitä muilla laskentamenetelmillä. Tämä johtuu todennäköisesti varmallalla puolella olevista yksinkertaistuksista, kuinka taivutus jakaantuu erinäisille liitososille.

Kuormitustapaukset		Laipan ruuvien leikkausresultantti	
<i>My</i>	<i>Mz</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kNm</i>		%	%
75	5	2,5	26,2
150	10	2,3	26,0
225	14	1,7	23,5
300	19	1,9	23,0
375	24	2,2	22,9
450	27	3,1	22,4

Kuva 5-7. Molemman suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

Kuormitustapaukset		Uuman pultin leikkausresultantti	
<i>My</i>	<i>Mz</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kNm</i>		%	%
75	5	-49,7	32,7
150	10	-48,4	40,0
225	14	-48,8	37,5
300	19	-48,4	36,7
375	24	-48,4	34,2
450	27	-47,5	30,1

Kuva 5-8. Molemmien suunnan taivutuksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

Viimeisessä kuormitusyhdistelmässä yhdessä vaikuttavat voimat ovat normaalivoima N , vahvemman suunnan momentti My sekä heikomman suunnan momentti Mz . Laipan ruuvien voimissa ei ole huomattavaa eroa kummassakaan tapauksessa. Uuman ruuveilla taas eroa syntyy käsin laskentaan, kun vahvemman suunnan momentti kasvaa suureksi. Tämä ero on huomattavissa jo aikaisemmassa kohdassa. Tässä taas Idea Statica ja Ansys ovat linjassa toistensa kanssa, mikä huomataan kuvasta B-13.

Kuormitustapaukset			Uuman ruuvien leikkausresultantti	
<i>N</i>	<i>My</i>	<i>Mz</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kN</i>	<i>kNm</i>		%	%
200	0	0	6,7	23,1
400	0	0	6,0	22,3
600	0	0	6,2	22,6
600	151,4	9,8	-25,5	23,7
600	302,8	19,6	-36,2	24,3
600	454,1	27,9	-41,1	19,4

Kuormitustapaukset			Laipan ruuvien leikkausresultantti	
<i>N</i>	<i>My</i>	<i>Mz</i>	<i>IDEA Statica vs. Mathcad</i>	<i>IDEA Statica vs. Ansys</i>
<i>kN</i>	<i>kNm</i>		%	%
100	0	0	-3,3	16,0
200	0	0	-3,3	5,5
300	0	0	2,9	9,4
400	0	0	-0,4	9,0
500	0	0	0,3	7,8
600	0	0	-0,3	9,1
600	76	5	1,0	7,5
600	151	10	1,6	5,9
600	228	15	1,7	4,8
600	303	20	1,6	4,8
600	379	24	1,7	6,1
600	454	28	1,1	9,8

Kuva 5-9. Molemmien suunnan taivutuksen sekä normaalivoiman kuormitustapauksessa eri liitososien eroavaisuudet prosentteina.

5.4 CBFEM vertailu luvun 4 laskentaan

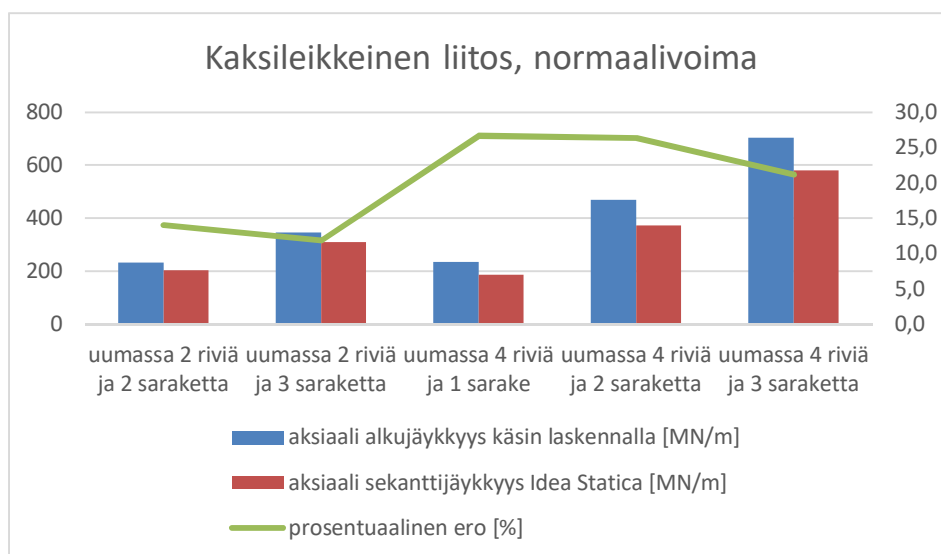
Tässä luvussa on vertailtu luvun 4 alkujäykkyyksien käsinlaskennan tuloksia CBFEM pohjaisen ohjelman antamiin tuloksiin. Tulokset eivät voi olla yhtenevät, koska käsinlaskennassa ei oteta huomioon profiilin ja levyn aksiaali-, leikkaus- tai taivutusjäykkyyttä. Näin ollen CBFEM:llä saadut tulokset pitäisivät olla jäykkyyden kannalta pienempiä, koska kaikki edellä menevät osat ovat olleet käsinlaskennassa täysin ideaalijäykkiä.

Vertailtaessa CBFEM ohjelman tuloksia käsinlaskentaan on aksiaalijäykkyyden osalta mahdollista saada pelkästään sekanttijäykkyyys. Sekanttijäykkyyttä voidaan kuitenkin pitää hyvin luotettavana vertailukohtana alkujäykkyydelle kuormituksen ollessa hyvin pieni [36]. Vertailtaessa taivutusjäykkyyttä ohjelman tuloksista saadaan luettua myös alkujäykkyyys liitokselle.

Ensimmäisenä vertailtavana asiana on tutkittu kaksileikkeistä liitosta normaalivoiman tapauksessa. Aksiaalialkujäykkyyys on laskettu uumassa useammalla eri ruuviryhmittelyllä.

	Kaksileikkeinen liitos, Normaalivoima		prosentuaalinen ero [%]
	aksiaali alkujäykkyyys käsinlaskennalla [MN/m]	aksiaali sekanttijäykkyyys Idea Statica [MN/m]	
uumassa 2 riviä ja 2 saraketta	230,37	202	14,0
uumassa 2 riviä ja 3 saraketta	345,56	309	11,8
uumassa 4 riviä ja 1 sarake	234,36	185	26,7
uumassa 4 riviä ja 2 saraketta	468,72	371	26,3
uumassa 4 riviä ja 3 saraketta	703,08	580	21,2

Taulukko 5. Kaksileikkeinen liitos, pelkät uuman ruuvit, normaalivoima.



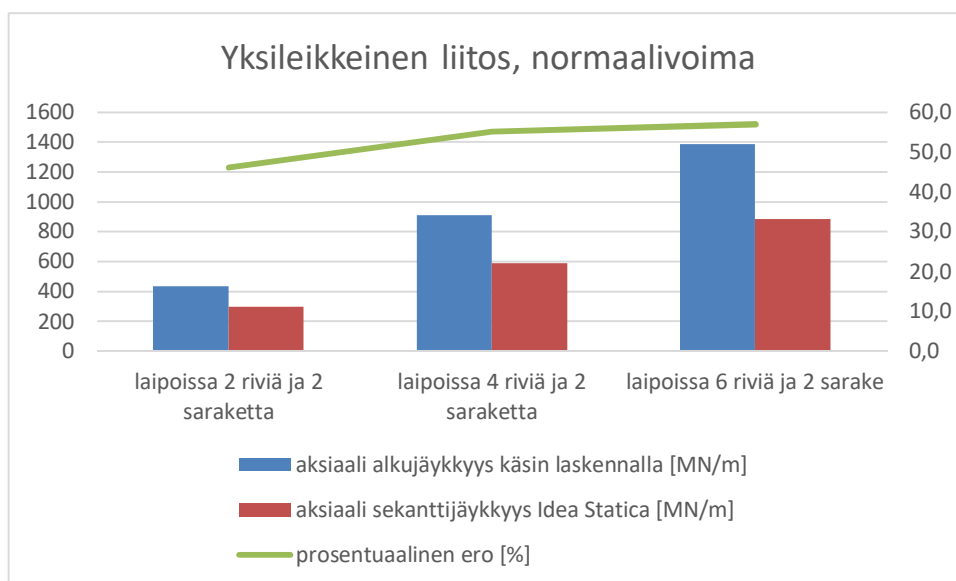
Kuva 5-10. Kaksileikkeisen liitoksen eroavaisuudet normaalivoiman tilanteessa.

Kuvasta 5-10 voidaan tehdä useita erilaisia havaintoja. Siinä huomataan, kuinka alkujäykkyydessä päästään tarkempaan tulokseen, kun tutkitaan pelkästään kahta ruuviriviä. Ruuvirivien lisääntyessä erot kasvavat suuremmiksi. Sitten taas liitoksen muuttuessa leveämmäksi päästään lähemmäksi CBFEM laskentaa. Tästä voidaan päätellä, että jäykkyyteen vaikuttaa jossain määrin levyn pituus eli levyn ja uuman aksiaalijäykkyys. Näistä kahdesta suurempi virhevaikutus on levyn aksiaalijäykkyydellä. Alkujäykkyydet eivät ole suuruusluokaltaan kovin erilaisia. Taulukosta 5 nähdään, että prosentuaalinen ero on pelkästään 14% kahdella ruuvirivillä. Ruuvirivien lisääntyessä neljään ja levyn pituuden kasvaessa lähes kaksinkertaiseksi prosentuaalinen erokin kasvaa noin kaksinkertaiseksi 27%. Levyn leveyden kasvaessa myös sen jäykkyys kasvaa hiukan ja näin ollen sillä on selitettävissä jäykkyyden kasvaminen ruuvisarakeiden lisääntyessä.

Toisena vertailtavana asiana on tutkittu yksileikkeistä liitosta normaalivoimalle. Yksileikkeinen liitos on toteutettu universaaliliitoksen kannalta oikein niin, että liitoksen geometria on symmetrinen. Liitoksessa on pelkästään laipan ruuvit vaikuttamassa jäykkyyteen.

	Yksileikkeinen liitos, Normaalivoima		
	aksiaali alkujäykkyys käsinlaskennalla [MN/m]	aksiaali sekanttijäykkyys Idea Statica [MN/m]	prosentuaalinen ero [%]
laipoissa 2 riviä ja 2 saraketta	433,86	297	46,1
laipoissa 4 riviä ja 2 saraketta	909,3	586	55,2
laipoissa 6 riviä ja 2 sarake	1386	883	57,0

Taulukko 6. Yksileikkeinen liitos, pelkät laipan ruuvit, normaalivoima.



Kuva 5-11. Yksileikkeisen liitoksen eroavaisuudet normaalivoiman tilanteessa.

Yksileikkeisessä liitoksessa alkujäykkyys eroaa huomattavasti käsinlaskennan ja CBFEM laskennan välillä. Taulukosta 6 nähdään, kuinka levyn pituuden vaikutus on suuruusluokkaa 9% kahden ja kuuden rivin välillä. Suurimman vaikutuksen eroavaisuuteen tekee levyn leveys. Liitoksen ollessa yksileikkeinen niin levyn pinta-ala on vain puolet kaksileikkeiseen verrattuna. Verrataan yksi- ja kaksileikkeistä, niin 4 riviseen, 2 sarakkeiseen kaksileikkeiseen (26,3%) ja 4 riviseen, 2 sarakkeiseen yksileikkeiseen (55,2%) eroavaisuudet ovat suuruusluokaltaan kaksinkertaisia. CBFEM laskenta antaa aina pienempiä aksiaalijäykkyyksiä, joten suunta on oikea.

Alkuperäisestä liitoksesta on laskettu aksiaalialkujäykkyys. Alla olevassa taulukossa 7 näytetään koko liitoksen käsinlaskennan tulos, CBFEM tulos sekä näiden prosentuaalinen ero.

Koko liitos, Normaalivoima		
aksiaali alkujäykkyys käsinlaskennalla [MN/m]	aksiaali sekanttijäykkyys Idea Statica [MN/m]	prosentuaalinen ero [%]
1854,7	1410	31,5

Taulukko 7. Koko liitos, normaalivoima.

Tässäkin tapauksessa päästään käsinlaskennalla jäykempään tulokseen kuin mitä CBFEM laskennalla. Virhelähde ei ole kovin iso, vaikkei käsinlaskennalla huomioidakaan kaikkea mahdollisia jäykkyyden pienennyksiä. 2,5% eroavaisuus voidaan selittää aikaisempien tulosten vertailujen perusteella.

Vertailtaessa liitosta, jossa on pelkästään laippojen ruuvit, saadaan eroksi käsinlaskennan ja CBFEM laskennan välillä on 24,1%. Käsinlaskenta on luotettavalla pohjalla ekvivalentin momenttivarren ja ekvivalentin jäykkyystekijän suhteen. Näiden määrittäminen tapahtuu

suoraviivaisesti eurokoodin mukaan ja siitä ei synny virhettä. Suuruusluokaltaan virhe on samaa luokkaa kuin aikaisemmin kaksileikkeisen normaalivoiman tapauksessa.

Laipan ruuvit, vahvemman suunnan taivutus		
kiertymäjäykkyys käsin-laskennalla [MNm]	kiertymäjäykkyys Idea Statica [MNm]	prosentuaalinen ero [%]
55,46	44,7	24,1

Taulukko 8. Pelkät laipan ruuvit, vahvemman suunnan taivutus.

Tutkittaessa vahvemman suunnan taivutusta pelkästään uuman ruuveilla, niin huomataan ettei kiertymäjäykkyys ole kovinkaan suuri. Kahdella ruuvisarakkeella kiertymäjäykkyyden määrittäminen eurokoodin [7] mukaisesti on suoraviivainen ja helppo tehtävä. CBFEM laskenta antaa kuitenkin kiertymäjäykkyydeksi hiukan jäykemmän tuloksen. Lukuarvollinen ero on kuitenkin todella pieni, joten virhe voi mennä pelkästään pyöristystoleransseihin. CBFEM laskenta ottaa huomioon kaiken mahdollisen. Käsinlaskennan oletus on, että ruuvi ottaa pelkkää leikkausta, mutta CBFEM laskennalla otetaan huomioon myös ruuvien aksiaaliset voimat.

Uuman ruuvit, vahvemman suunnan taivutus		
kiertymäjäykkyys käsin-laskennalla [MNm]	kiertymäjäykkyys Idea Statica [MNm]	prosentuaalinen ero [%]
1,69	2	-15,7

Taulukko 9. Pelkät uuman ruuvit, vahvemman suunnan taivutus.

Taulukon 9 tulosta voidaan pitää prosentuaalisesti isona erona, mutta lukuarvallisesti sitä voidaan pitää hyvin mitättömänä.

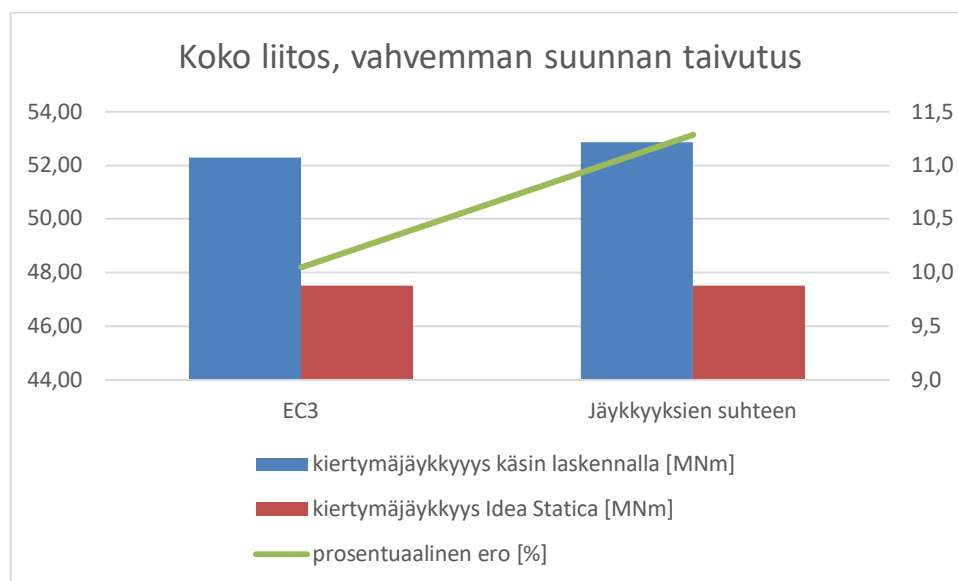
Koko liitoksen vahvemman suunnan taivutusta on laskettu kahdella eri periaatteella. Ensimmäisessä eurokoodin 3 mukaisesti määrittämällä puristuskeskiö laippaan, jolloin kaikki muut ruuvisarakkeet ovat vedolla. Toisessa liitoksen neutraaliakselin on oletettu sijaitsevan poikkileikkauksen keskellä, jolloin sen toisella puolella olevat ruuvisarakkeet ovat vedolla ja loput puristuksella. Puristuskeskiö on määritetty jäykkyyksien suhteen. Tuloksista nähdään, että eurokoodin mukaisesti määritetty liitoksen alkujäykkyys on lähempänä CBFEM laskennan tuloksia.

	Koko liitos, vahvemman suunnan taivutus		
	kiertymäjäykkyys käsinlaskennalla [MNm]	kiertymäjäykkyys Idea Statica [MNm]	prosentuaalinen ero [%]
Eurokoodin 3 mukaan	52,27	47,5	10,1
Jäykkyyksien suhteen	52,86	47,5	11,3

Taulukko 10. Koko liitos, vahvemman suunnan taivutus.

Taulukon 10 tuloksien virheen suuruudesta voidaan päätellä, että erinäiset virheet kumoavat toisiansa tässä. Aikaisemmin pelkkien laippojen ruuvien osalta virhe on ollut 24,1%

niin, että käsinlaskenta on antanut suurempia tuloksia. Taas pelkkien uuman ruuvien osalta virhe on ollut -15,7% eli käsinlaskenta on antanut pienempiä tuloksia.



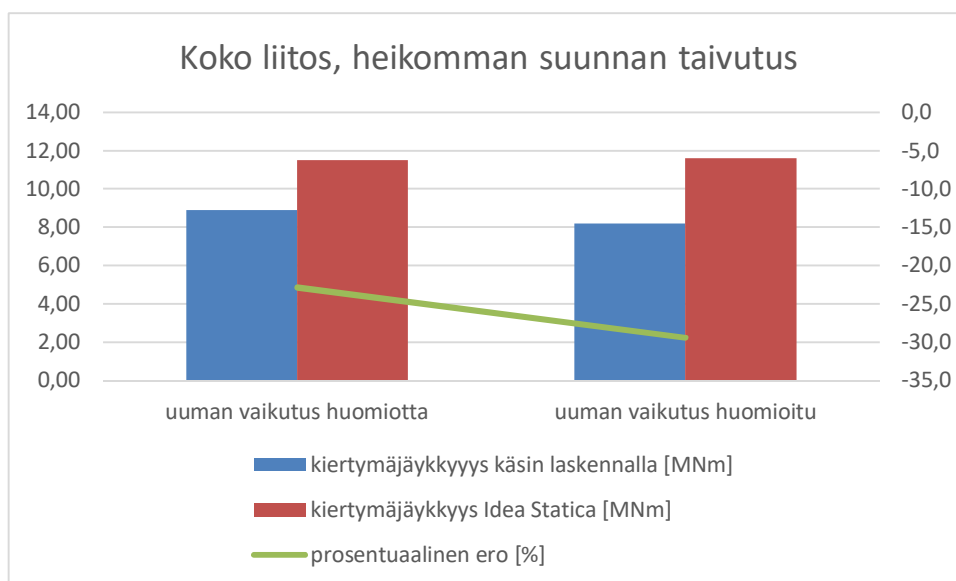
Kuva 5-12. Erot vahvemman suunnan taivutuksessa.

Koko liitoksen alkujäykkyys on laskettu myös heikomman suunnan taivutukselle. Vertailussa CBFEM laskentaan huomataan, että jäykkyys on paljon pienempi käsin laskettaessa. Tässäkin neutraaliakselin suhteen laskettu jäykkyys (uuman vaikutus huomiotta) päästään lähemmäs toisiaan.

	Koko liitos, heikomman suunnan taivutus		
	kiertymäjäykkyys käsinlaskennalla [MNm]	kiertymäjäykkyys Idea Statica [MNm]	prosentuaalinen ero [%]
Jäykkyysien suhteen	8,87	11,5	-22,9
Eurokoodin 3 mukaan	8,19	11,5	-29,4

Taulukko 11. Koko liitos heikomman suunnan taivutus.

Syy siihen, miksi taivutusjäykkyys käsin laskettaessa on pienempi, liittyy varmasti tapaan mallintaa ruuvien käyttäytyminen. Tulos on pienempi, vaikka käsinlaskennassa levyn vahvemman suunnan taivutusjäykkyys kuvitellaan olevan ääretön.



Kuva 5-13. Erot heikomman suunnan taivutuksessa.

Seuraavassa lasketaan Idea Staticalla myös useamman suunnan taivutukseen useampi erilainen tapaus. Päästään tutkimaan kuinka ne eroavat käsinlaskennassa tehdyistä oletuksista. Oletukset olivat, että alkujäykkyys on sama kaikille yhdistelmille kuin mitä niiden yksittäisille osille.

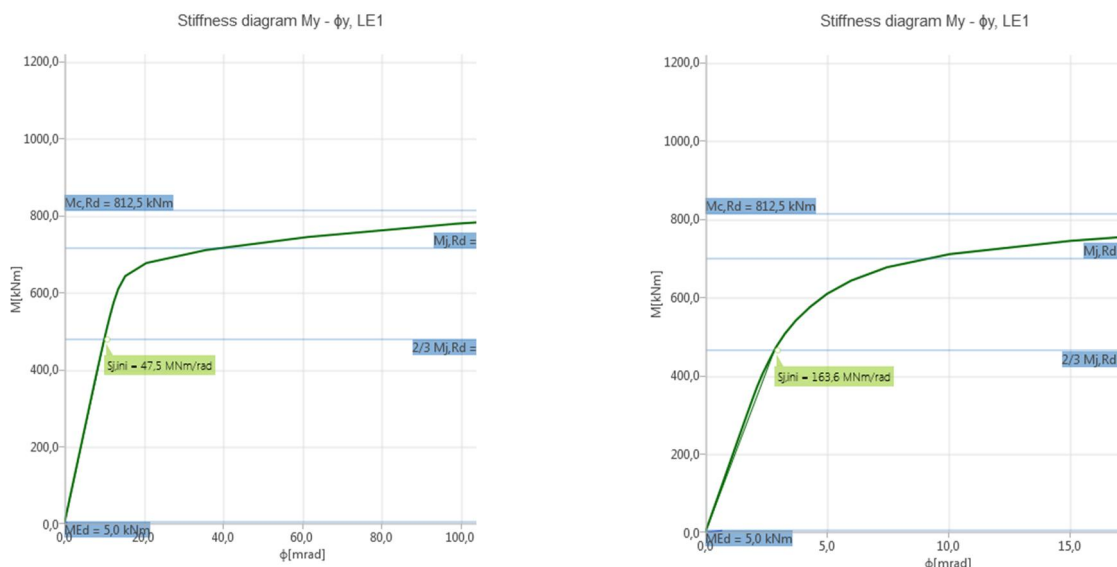
kuormitusyhdistelmä:	N [MN/m]	My [MNm]	Mz [MNm]
N + My	1139	47,5	
N + Mz	878		11,6
My + Mz		163,6	11,2
N + My + Mz	880	163,5	11,2

Taulukko 12. Idea Staticasta saadut yhteisvaikutusjäykkyydet.

Ensimmäisessä kuormitusyhdistelmässä on normaalivoima sekä vahvemman suunnan taivutus. Vahvemman suunnan jäykkyys on täysin sama mitä on aikaisemmin yksittäiselle kuormitukselle laskettu. Aksiaalijäykkyyden pieneminen 1410 MN/m 1139MN/m osoittaa siitä, että laskennassa vahvemman suunnan taivutuksessa saman suunnan voimat aiheuttavat pienennyksen aksiaalialkujäykkyyteen.

Toisessa kuormitustapauksessa heikomman suunnan momentti aiheuttaa edellistä isomman pienennyksen aksiaalialkujäykkyyteen. Jäykkyys pienenee 1410MN/m aina 878MN/m. Jäykkyys on samaa kokoluokkaa kuin pelkästään laippojen ruuveilla. Heikomman suunnan taivutusjäykkyys pysyy täysin samana kuin aikaisemmin erikseen laskettu arvo.

Kolmantena kuormitustapauksena on tutkittu vahvemman ja heikomman suunnan taivutusta. Tässä huomataan jostain syystä merkittävä jäykkyyden kasvu vahvemmassa suunnassa.



Kuva 5-14. Momentti-kiertymäkuvaaja.

Kuvassa 5-14 on esitetty vasemmalla puolella pelkästään vahvemman suunnan taivutuksen momentti-kiertymäkuvaaja. Siinä näytetään piste, jossa alkukiertymäjäykkyys määritetään ja se on $2/3 M_{j,Rd}$. $M_{j,Rd}$ kertoo liitoksen momenttikestävyyden. Samassa kuvassa 5-14 oikealla puolella on momentti-kiertymäkuvaaja siitä, kun liitokseen vaikuttaa samaan aikaan heikomman suunnan taivutus. Liitoksen raja-arvo $M_{j,Rd}$ on lähes täysin sama, mutta kiertymä on jostain syystä pienentynyt ja näin ollen liitoksen alkukiertymäjäykkyys on kasvanut lähes nelinkertaiseksi.

Viimeisessä kuormitustapauksessa kaikki kolme voimaa vaikuttaa samaan aikaan. Tällöin heikomman suunnan taivutusjäykkyys pysyy edelleen täysin samana verrattuna yksittäin laskettuun tulokseen. Aksiaalijäykkyys on sama kuin heikomman suunnan taivutuksen kanssa samaan aikaan vaikuttavassa kuormitustapauksessa. Vahvemman suunnan taivutus on sama kuin heikomman suunnan taivutuksen kanssa samaan aikaan vaikuttavassa kuormitustapauksessa.

Ongelmana näiden tulosten analysoinnissa on Idea Statica ohjelmiston vajavainen raportointi. Jäykkyyden kasvaminen lähes nelinkertaiseksi kahteen suuntaan taivutetussa rakenteessa näyttää olevan erittäin epätodennäköistä. Tämä tulos vaatii jatkossa vielä lisää tutkimista jäykkyyden osalta. Aksiaalijäykkyyden sekä vahvemman suunnan taivutuksen tai heikomman suunnan taivutuksen kanssa voidaan todeta tulosten olevan hyvin linjassa käsinlaskennan ja aikaisempien yksittäin laskettujen kuormitustapausten kanssa.

6. YHTEENVETO JA TULOKSET

Kahteen suuntaan taivutettua universaaliliitosta ja sen toimintaa on tutkittu yllättävän vähän liitoksen käyttäytymisen osalta. Tämä diplomityö sai pohjansa aikaisemmin tehdyn diplomityön [6] pohjalta, jossa määritettiin voimajakauma kahteen suuntaan taivutetulle universaaliliitokselle. Tässä diplomityössä on varmistettu Idea Statica ohjelmiston luotettavuutta laskemalla aikaisemmassa diplomityössä [6] saatuja samoja kuormituksia uudelleen. Luvussa 5.3 on tarkemmin eritelty tuloksia ja niiden vertailua. Kuvaajat löytyvät taas liitteestä B: Idea Statican vertailu aikaisempiin tuloksiin.

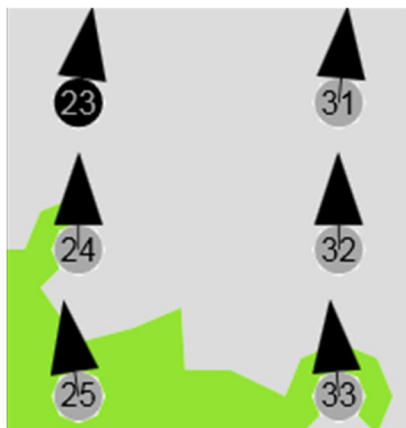
Voimajakauman määrittämisessä huomattiin, että uuman ruuvien voimajakauman määrittäminen Idea Staticalla on erittäin varmallaa puolella. Ansys antaa aina pienempiä arvoja kuin mitä Idea Statica, kun on laskettu uuman ruuvien voimia. Käsinsäilylaskennalla on aikaisemmassa tutkimuksessa [6] laskettu tämänhetkisen tietämyksen mukaan uuman ruuveille ruuvivoimia. Näitä tuloksia vertailtaessa huomataan, että virhe on erittäin suuri Ansysin tuloksiin. Idea Statica sijoittuu näiden kahden ääripään välille. Samaisessa tutkimuksessa on laskettu käsin myös laipan ruuveille voimia erinäisillä kuormitusyhdistelmillä. Laipan ruuvien osalta voidaan huomata, että käsinsäilylaskenta sekä molemmilla ohjelmistoilla saadut tulokset ovat hyvin linjassa toistensa kanssa. Idea Statica ja käsinsäilylaskenta on prosentuaalisesti laipan ruuvien osalta lähes täysin identtiset tulokset. Ansys antaa aina hiukan pienempiä tuloksia. Ansysin osalta voidaan todeta, että siinä FEM-laskenta ottaa huomioon kaiken mahdollisen. Tietenkin kaikki Ansysin tuloksien oletukset perustuvat siihen, että Ansys malli on luotu oikein ja noudattaa todellisia fysikaalisia ilmiöitä.

Liitoksen käyttäytymistä voidaan tutkia kestävyuden ja jäykkyyden osalta. Universaaliliitoksen kestävyyttä onkin tutkittu, laskettu ja testattu paljon [1, 4-9], joten kestävyuden tutkiminen on jätetty pois tässä diplomityössä. Tarkemmin on lähdetty tutkimaan liitoksen alkujäykkyyden määrittästä tämän hetkisten tutkimusten pohjalta. Tämä diplomityö on rajattu kattamaan pelkästään reunapuristusjäykkyyden tutkimista, jonka on huomattu tässä diplomityössä aiheuttavan suurimman vaikutuksen liitoksen jäykkyyteen. Suoranaisesti universaaliliitosta käsitteleviä tutkimuksia jäykkyyden määrittämisestä ei löydy ollenkaan, joten asiaa on pitänyt lähteä tutkimaan yleisemmin. Reunapuristusjäykkyydestä löytyi yksi todella hyvä ja luotettava tutkimus [12], komponenttimenetelmästä yleisesti löytyi enemmän tuoretta tietoa [7, 13, 27] sekä 3D-komponenttimenetelmästä [15, 17, 31, 32]. Näiden pohjalta pystyttiin luomaan universaaliliitokselle 3D-jousimalli. 3D-jousimallin luominen liitokselle onnistui hyvin ja se kuvaa raollista universaaliliitoksen toimintaa todenmukaisesti. Se, että liitosta on käsinsäilylaskennan takia yksinkertaistettu paljon, aiheuttaa selkeitä virheitä lopputuloksiin, mutta alkuperäinen malli on hyvin tarkka. Reunapuristuksen osalta liitoksen 3D-jousimalli löytyy luvusta 4.2.3. Samaista mallia voidaan myös soveltaa jatkossa ottaen huomioon myös muitakin jäykkyystekijöitä.

Taivutuksen suhteen puristuskeskiön paikan määrittämisessä käytettiin kahta erilaista tapaa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa puristuskeskiön sijainti määritettiin kauimpaan puristettuun jousiriviin. Vahvemman suunnan taivutuksessa puristuskeskiö sijoittui laippaan ja heikomman suunnan taivutuksessa kauimpaan ruuviriviin. Näin ollen kaikki muut ruuvirivit olivat vedettyjä. Tämä tapa noudattaa eurokoodin tapaa mallintaa liitoksen kiertymäjäykkyyttä päätylevyliitoksessa. Toisessa vaihtoehdossa puristuskeskiö saatiin ensin määrittämällä neutraaliakseli symmetrisesti liitoksen keskelle. Tämän jälkeen puristuskeskiön sijainti haettiin jousten jäykkyyksien suhteen. Tällöin puristettuja ja vedettyjä ruuvirivejä oli yhtä monta. Tämän jälkeen laskenta hoidettiin samalla tavalla kuin eurokoodissa. Näiden kahden laskentatavan välillä ei ollut huomattavaa eroa. Jäykkyyksien suhteen laskemalla huomattiin, että se antaa hiukan jäykempiä tuloksia kuin mitä eurokoodi.

Alkujäykkyys on laskettu käsin yleisimmille kuormituksille: normaalivoima, vahvemman suunnan taivutus sekä heikomman suunnan taivutus. Normaalivoiman tuloksia voidaan pitää hyvinkin luotettavina reunapuristuksen osalta. Käsinlaskenta ei ota huomioon kuitenkaan liitoslevyjen tai profiilin aksiaalijäykkyyksiä, jolloin käsin laskettu tulos jää jäykemmäksi kuin vertailutulos Idea Staticalla. Vahvemman suunnan taivutuksessa virhelähteitä syntyy enemmän, käsinlaskenta ei ota huomioon muuta kuin ruuvien leikkauksen. Todellisuudessa liitokseen syntyy myös ruuveihin normaalivoimaa. Tuloksia voidaan pitää kuitenkin oikeansuuntaisina, kun on vertailtu käsinlaskennan ja Idea Statican antamia tuloksia.

Heikommassa suunnan taivutuksessa syntyy jo huomattavasti enemmän virhettä. Ruuveihin syntyy sekä x-, että y-suuntaisia voimia ja käsinlaskenta ottaa huomioon pelkästään x-suuntaan vaikuttavat voimat. Tämä huomataan vertailtaessa käsinlaskennan ja Idea Statican tuloksia. Näistä tuloksista nähdään, että käsinlaskennassa saadut tulokset ovat tässä vaiheessa löysempiä kuin mitä Idea Staticalla. Vaikkakin käsinlaskennasta puuttuu laippalevyn taivutus- ja aksiaalijäykkyys. Tämä selittyy yhdeltä osalta siihen, että käsinlaskenta ottaa huomioon pelkästään x-akselin suuntaista voimaa. Toinen merkittävä syy on Idea Statican CBFEM laskenta. Ohjelmiston FEM laskenta ottaa huomioon ruuvien kitkan vaikutuksen liitoksessa. Tästä tuloksesta voitaisiin olettaa, että Idea Statica ei osaa laskea komponenttimenetelmällä heikomman suunnan taivutusta, jolloin se ottaa avuksi FEM laskennan. Virheen suuruus kasvaa huomattavasti, kun liitokseen lisätään vielä lisää ruuvirivejä ja -sarakkeita. Alla olevassa kuvassa 6-1 nähdään jollain tapaa selkeästi se, kuinka ruuvien leikkausvoima ei ole täysin x-akselin suuntaista.



Kuva 6-1. Laippalevyn ruuvien leikkausvoimien resultantit.

Useampaan suuntaan taivutetulla rakenteella huomataan, että Idea Statica ei olekaan luotettava jäykkyyden määrittämisessä. Normaalivoiman ja vahvemman suunnan taivutuksella Idea Statica antaa järkevän suuntaisia tuloksia. Taivutus vähentää liitoksen aksiaalijäykkyyttä, joka on täysin järkevää, koska tietyillä liitoksen osilla on ainoastaan tietty jäykkyys. Mikäli voimat vaikuttavat samassa liitoksen osassa samaan suuntaan, voidaan olettaa silloin jommankumman, tai molempien, jäykkyyden pienenevän.

Molemman suunnan taivutuksessa heikomman suunnan jäykkyys pysyy täysin samana kuin mitä tilanteessa, kun jäykkyys on laskettu erikseen. Tällöin taas vahvemman suunnan jäykkyys kasvaa jostain syystä lähes 4-kertaiseksi. Se ei voi pitää paikkansa. Riippumatta tilanteesta, todellisuudessa heikomman suunnan taivutus pienentää vahvemman suunnan jäykkyyttä ja kapasiteettia.

Tilanteessa, jossa normaalivoima ja heikomman suunnan taivutus toimivat samaan aikaan, antaa Idea Statica heikomman suunnan taivutukselle täysin saman jäykkyyden kuin aikaisemmin. Toisaalta heikomman suunnan taivutus vaikuttaa selkeästi enemmän aksiaalijäykkyyden pienemiseen. Aksiaalijäykkyyden tuloksen suuruus on samaa luokkaa kuin, jos liitoksessa toimisi pelkästään laippojen ruuvit.

Tässä työssä testattiin myös tilanne, jossa kaikki kolme voimaa vaikuttavat samaan aikaan. Tässäkin kohtaa tapahtuu sama virhe, että vahvemman suunnan jäykkyys kasvaa lähes 4-kertaiseksi heikomman suunnan taivutuksen kanssa verrattuna pelkkään taivutukseen. Aksiaalijäykkyys pienenee yhtä paljon kuin yhdessä heikomman suunnan taivutuksen kanssa ja heikomman suunnan jäykkyys pysyy täysin samana verrattuna pelkkään heikomman suunnan taivutukseen.

Leikkausvoima on laskennallisesti jätetty pois, koska erinäisten tutkimusten [13, 37] mukaan leikkausvoiman suuruus ei vaikuta kohtisuoraan vaikuttaviin aksiaali- tai taivutusjäykkyyksiin. Näin ollen luvussa 4.2.3 esitetyllä 3D-jousimallilla voidaan mallintaa erilisinä ilmiöinä liitoksen aksiaali-, taivutus- ja leikkausjäykkyyttä.

Liitokselle on laskettu eurokoodin [7] mukaiset jäykkyyden raja-arvot vahvempaan ja heikompaan suuntaan oleville taivutuksille. Luvussa 4.3.5 on esitetty laskelmat, joista selviää, kuinka molempiin suuntiin liitos luokitellaan osittain jäykäksi. Tulos on sama, vaikka verrattaisiin tuloksia käsinlaskentaan tai Idea Staticaan.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä on tutkittu raollisen universaaliliitoksen alkujäykkyyttä rajoitetuin osin. Liitoksen geometria on mukana kokonaisuudessaan, mutta jäykkyyden osalta on otettu huomioon pelkästään reunapuristusjäykkyys sekä ruuvien leikkausjäykkyys. Koko liitoksen jäykkyyden kuvaavaa jousimallia tehdessä, on pyritty huomioimaan soveltamismahdollisuudet jatkossa myös levyjen aksiaali- ja taivutusjäykkyyksille. Perusperiaate 3D-jousimallissa on siis toimiva jatkotutkimuksien kannalta. Kyseinen periaate ei toimi kuin pelkästään raollisen universaaliliitoksen osalta. Siirryttäessä kontaktipinnoilla olevaan liitokseen, jossa voimat välittyvät osittain profiilin päiden välillä, ei tätä jousimallia voida hyödyntää suoraan tällä tapaa kuin mitä tässä diplomityössä.

Komponenttimenetelmän reunapuristuskomponentin soveltaminen universaaliliitoksessa on mahdollista. Eurokoodin [7] mukaisista komponentteja voidaan hyvin soveltaa myös tämän tyyliin liitokseen. Tämä on ollutkin komponenttimenetelmän kehittäjien perusperiaatteena, että eurokoodissa annettuja komponentteja voitaisiin hyödyntää liitoksessa kuin liitoksessa. Siinä vastuu ainoastaan siirtyy suunnittelijalle, kuinka liitoksen rakennemalli pystytään toteuttamaan niin, että se kuvaa todellista tilannetta. Tässä työssä suurin ongelma on ollut löytää kirjallisuutta, jossa kuvattaisiin universaaliliitoksen rakennemallin luomista. Tähän ei suoraan annettu vastausta vaan mallin luomiseen on löytynyt lähteistä hyviä esimerkkejä muiden tyyppisistä liitoksista. Perusperiaatteiden toimiessa samanlaisina on voitu soveltaa tutkimuksia muista liitostyypeistä, jolloin on saatu muokattua juuri tähän tilanteeseen sopiva 3D-rakennemalli kuvaamaan universaaliliitoksen käyttäytymistä. Käsineläskennan osalta on jouduttu tekemään joitain yksinkertaistuksia liitokseen, jolloin tulosten luotettavuus on hiukan kärsinyt. Todennäköisesti tätä virhettä voidaan pitää kuitenkin hyvin pienenä tutkittaessa yksittäisiä kuormituksia.

Näin ollen voidaan vastata kysymykseen, että kuinka hyvin reunapuristuskomponenttia voidaan hyödyntää universaaliliitoksen jäykkyyden laskemiseen. Erilaisten kuormitustapausten, liitososien ja geometrioiden avulla on saatu kohtuullisen kattava määrä tuloksia. Tuloksista voidaan huomata, että lähes kaikki käsineläskennan tulokset ovat linjassa Idea Statican CBFEM laskennan kanssa. Idea Staticasta löytyy kaksi poikkeusta. Ensimmäinen on, kun tutkitaan heikomman suunnan taivutusta. Tällöin Idea Statica antaa liitoksen alkujäykkyydelle selkeästi jäykemmän tuloksen kuin käsineläskenta. Tämän ei pitäisi olla mahdollista, koska käsineläskenta ei ota huomioon kaikki jäykkyyteen liittyviä tekijöitä. Kuten aikaisemmin on pohdittu, niin käsineläskenta ei ota huomioon voimien jakautumista x- ja y- komponentteihin.

Toinen poikkeavaisuus tapahtuu kuormitusyhdistelmissä, joissa heikomman suunnan taivutus toimii yhdessä vahvemman suunnan taivutuksen kanssa. Tällöin vahvemman suunnan alkutaivutusjäykkyys kasvaa 4-kertaiseksi. Tämän syytä voidaan pelkästään arvella,

koska ohjelman teoreettiseen pohjaan ei päästä kovin syvälle käsiksi, sekä tulokset ovat hyvin niukkoja. Muutaman mahdollinen syy voi löytyä siitä, ettei kahteen suuntaan taivutetulle rakenteelle ole löytynyt luotettavia tutkimuksia ja näin ollen ohjelmiston FEM laskennan on annettu virheellisesti laskea tulokset. Yksi toinen syy voi löytyä Idea Statican tavasta mallintaa liitososien ja ruuvien välistä toimintaa. Jolloin useamman voiman vaikutus sekoittaa tilanteen. Joka tapauksessa muiden kuormitustapausten sekä voimajakaumaa määritettäessä Idea Statica menee linjassa käsinlaskennan kanssa.

Yhtenä mielenkiintoisena asiana tässä diplomityössä huomattiin, että käytetty universaaliliitos luokitellaan eurokoodin mukaisesti osittain jäykäksi liitokseksi. Voisi hyvin sanoa, että aina kun käytetään laipoissa pelkästään yksileikkeistä liitosta, liitoksesta tulee osittain jäykkä. Jäykän liitoksen raja-arvo on selkeästi isompi kuin kummallakaan tavalla laskettu liitoksen jäykkyys. Tässä työssä on jätetty tutkimatta, voiko täysin kaksileikkeinen liitos olla komponenttimenetelmällä saatujen tulosten osalta täysin jäykkä. Tämä olisi ollut yksi mielenkiintoinen kohde, koska yleensä globaalissa laskentamallissa pilarien sekä palkkien universaaliliitokset mallinnetaan täysin jäykinä liitoksina. Tämä vaikuttaa huomattavasti koko rungon voimien jakautumiseen isommissa kohteissa.

LÄHTEET

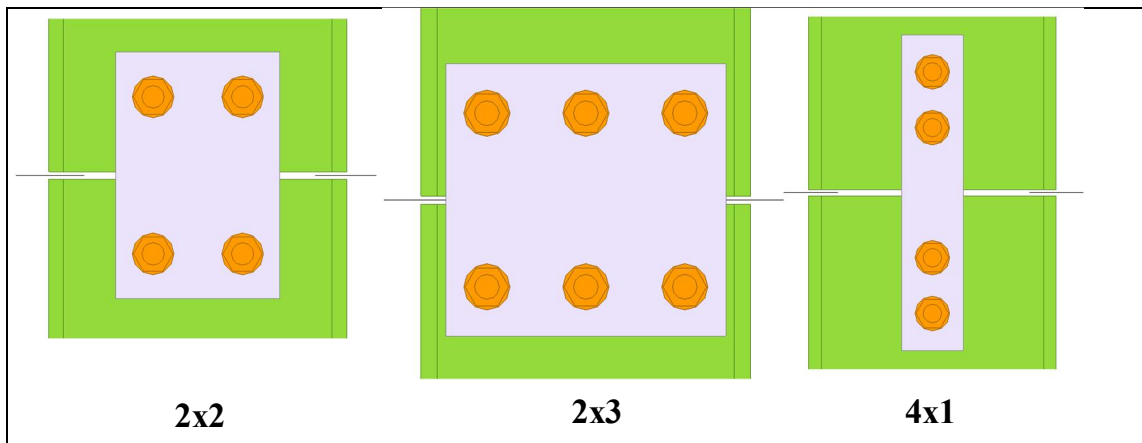
- [1] Joints in steel construction: Moment - resisting joints to eurocode 3, P398 ed. The Steel Construction Institute, Ascot, 2013, .
- [2] V. Jokela, Teräsluostosten mitoititus ja kustannuslaskenta, 2016, Available: [http://tuni.summon.serialssoluti-
ons.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwjV09T8MwED2hdEEsIEB8KyNLEh-
MnjJNCaVSpYitzFGxHChUZWvsf8U_4Yzy7fImpkz1Yp9NZd-9Ov-
ncm4nnKkn8xAUIDkeeK1cwYURpeFnedqaTJddFpE-
QbyPT_JhwYFv1z80ro1vMr_s6FS62wKY2somW3nD2SIuUD_StYZU-
KlGGJ54niaLaDK9X8zmAAv7Td0LYNEc0sHjn0fuI9rrh2NKlmb98Y6kDh4Ew47xGz
aDdZv4tYtXnsU0jg7Xs1n5Zu4TyprZcjpPILvdqtf6Cc0BeTwvo_1Rqw1q8VOKU-
MibM4rrSvWoGKQq-
BYfr8Jcc8K606CvBip5153S7q9SL3Y9e0j5AXoT2JnlFkV07c43FjcPNI6k-ATw7ev0](http://tuni.summon.serialssoluti-
ons.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwjV09T8MwED2hdEEsIEB8KyNLEh-
MnjJNCaVSpYitzFGxHChUZWvsf8U_4Yzy7fImpkz1Yp9NZd-9Ov-
ncm4nnKkn8xAUIDkeeK1cwYURpeFnedqaTJddFpE-
QbyPT_JhwYFv1z80ro1vMr_s6FS62wKY2somW3nD2SIuUD_StYZU-
KlGGJ54niaLaDK9X8zmAAv7Td0LYNEc0sHjn0fuI9rrh2NKlmb98Y6kDh4Ew47xGz
aDdZv4tYtXnsU0jg7Xs1n5Zu4TyprZcjpPILvdqtf6Cc0BeTwvo_1Rqw1q8VOKU-
MibM4rrSvWoGKQq-
BYfr8Jcc8K606CvBip5153S7q9SL3Y9e0j5AXoT2JnlFkV07c43FjcPNI6k-ATw7ev0).
- [3] K. Oh, R. Li, L. Chen, S. Hong, K. Lee, Cyclic testing of steel column-tree moment connections with weakened beam splices, International Journal of Steel Structures, Vol. 14, Iss. 3, 2014, pp. 471-478.
- [4] M. Brunner, Steel Bridge Design Handbook: Splice Design, HDR Engineering, Inc., Vol. 14, 2012, pp. 91. [https://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/pubs/ifl2052/vo-
lume14.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/pubs/ifl2052/vo-
lume14.pdf).
- [5] M. Justin, Behavior of a Steel Girder Bolted Splice Connection, Federal Highway Administration, 2017, pp. 86. [https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/inf-
rastructure/structures/bridge/17042/17042.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/inf-
rastructure/structures/bridge/17042/17042.pdf).
- [6] P. Satamo, Beam and column splice bolt shear forces with bidirectional bending, Tampereen teknillinen yliopisto, Talouden ja rakentamisen tiedekunta, Tampere, 2017, Available: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201711242260>.
- [7] SFS-EN 1993-1-8, Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2005, .
- [8] SKOL Eurocode-laskentapohjien laadintahanke 2008-, SKOL ry, web page. Available (accessed 17.10.2018): <https://skol.teknologiateollisuus.fi/eurocode-laskentapohjat>.
- [9] ESDEP Lecture note Lecture 11.8: Splices in Buildings, The European Steel Design Education Programme, web page. Available (accessed 09.01.2019): [http://fgg-
web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg11/10800.htm](http://fgg-
web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg11/10800.htm).
- [10] SFS-EN 1993-1-8/AC:en, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009, .
- [11] A. Tapiola, Teräsrakenteiden toteuttamisen vaatimukset standardin EN 1090 mukaan: diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013, .

- [12] K. Bzdawka, M. Heinisuo, Fin plate joint using component method of EN 1993-1-8, *Rakenteiden Mekaniikka*, Vol. 43, Iss. 1, 2010, pp. 25-43.
- [13] F.M. Block, I.W. Burgess, J.B. Davison, R.J. Plank, The development of a component-based connection element for endplate connections in fire, *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Iss. 6, 2007, pp. 498-506.
- [14] M. Steenhuis, J.-. Jaspart, F. Gomes, T. Leino, Application of the component method to steel joints, *Civil Engineering Structural Connections Conference*, 1998, pp. 125-143.
- [15] K. Mela, RAK-33310 Teräsrakenteiden jatkokurssi, 2017, .
- [16] F. Wald, Z. Sokol, C.M. Steenhuis, J.-. Jaspart, Component method for steel column bases, *Heron*, Vol. 54, Iss. 1/2, 2008, pp. 3-20.
- [17] H. Perttola, Tampereen teknillinen yliopisto, 3D component method based on the rakes, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017, .
- [18] P. Zoetemeijer, Summary of Research on Bolted Beam-to-Column Connections (period 1978-1983). Report No. 6-85-M, Seven Laboratory, Delft, 1983, .
- [19] F. Tschemmerneegg, A. Tautschnig, H. Klein, Braun Ch., Humer Ch, Zur Nachgiebigkeit von Rahmenknoten - Teil 1 (Semi-rigid joints of frame structures Vol. 1 in German), *Stahlbau* 56, Heft 10, 1987, pp. 299-306.
- [20] L. Simões da Silva, A. Santiago, P. Vila Real, A component model for the behaviour of steel joints at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, Iss. 11, 2001, pp. 1169-1195.
- [21] K. Al-Jabri, The behaviour of steel and composite beam-to-column connections in fire, University of Sheffield, 1999, .
- [22] L. Leston-Jones, The influence of semi-rigid connections on the performance of steel framed structures in fire, University of Sheffield, 1997, .
- [23] Revised Annex J, Design of Steel Structures. CEN, European Committee for Standardization, Document CEN/TC 250/SC 3-N 419 E, Brussels, 1994, .
- [24] T.Q. Li, B.S. Choo, D.A. Nethercot, Connection element method for the analysis of semi-rigid frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 32, Iss. 2, 1995, pp. 143-171.
- [25] L.N. Lowes, A. Altoontash, Modeling Reinforced-Concrete Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, Iss. 12, 2003, pp. 1686-1697.
- [26] E. Bayo, J.M. Cabrero, B. Gil, An effective component-based method to model semi-rigid connections for the global analysis of steel and composite structures, *Engineering Structures*, Vol. 28, Iss. 1, 2006, pp. 97-108.

- [27] A.A. Del Savio, D.A. Nethercot, Vellasco, P. C. G. S., S.A.L. Andrade, L.F. Martha, Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, Iss. 8, 2009, pp. 1876-1895.
- [28] Idea Statica Theoretical background, https://resources.ideastatica.com/Content/02_Steel/Theoretical_background/1_General.htm.
- [29] M. Tuomala, Plastisuusteoria, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Luentomoniste, 2017, 302 p.
- [30] ESDEP Lecture note Lecture 11.3.1: Connection with Non-Preloaded Bolts, The European Steel Design Education Programme, web page. Available (accessed 09.01.2019): <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg11/l0310.htm>.
- [31] M. Heinisuo, V. Laine, E. Lehtimäki, Enlargement of the component method into 3D, 2009, .
- [32] M. Heinisuo, H. Perttola, H. Ronni, A step towards the 3D component method for modelling beam-to-column joints, Steel Construction, Vol. 7, Iss. 1, 2014, pp. 8-13.
- [33] I. Babuska, J.T. Oden, Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, Iss. 36, 2004, pp. 4057-4066.
- [34] VDI 2230 Part 1, The Association of German Engineers, Germany, 2015, .
- [35] VDI 2230 Part 2, The Association of German Engineers, Germany, 2014, .
- [36] T.J. Sullivan, G.M. Calvi, M.J.N Priestley, Initial stiffness versus secant stiffness in displacement based design, Vancouver B.C. Canada, .
- [37] I. Burgess, Connection Modelling in Fire, Department of Civil and Structural Engineering, United Kingdom, 2007, .

LIITE A ALKUJÄYKKYYKSIEN KÄSINLASKENTA

Tämän liitteen tarkoitus on näyttää yksityiskohtaiset laskelmat luvun 4.3.1, 4.3.2 ja 4.3.3 mukaisille kuormituksille. Tulokset on näytetty myös samoissa luvuissa yhteen koottuna. Kaksileikkeiselle liitokselle laskettiin viisi erilaista ruuviyhdistelmää. Nämä laskettiin normaalivoiman tapauksessa.



Kuva A-0-1. 2x2, 2x3 ja 4x1 ruuviryhmät.

Ruuviryhmä 2x2:

$$k_{wx(2x2)} = 1 / (1 / 2k_{wp1bbx} + 1 / 2k_{wb} + 1 / k_{w3bbx}) = 1,097mm$$

Alkujäykkyudeksi saadaan:

$$S_{ini} = 2 * 1 / (1 / k_{wx(2x2)} + 1 / k_{wx(2x2)}) * E = 230,37MN/m$$

Ruuviryhmä 2x3:

$$k_{wx(2x3)} = 1,097mm$$

Alkujäykkyudeksi saadaan:

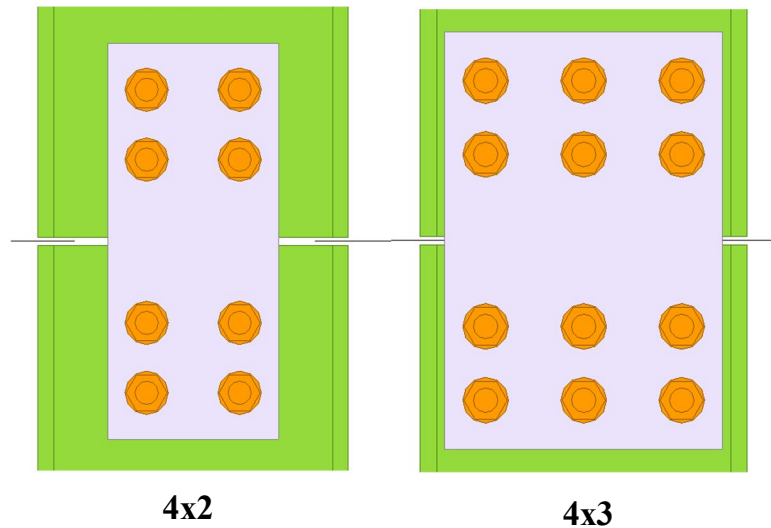
$$S_{ini} = 3 * 1 / (1 / k_{wx(2x3)} + 1 / k_{wx(2x3)}) * E = 345,56MN/m$$

Ruuviryhmä 4x1:

$$k_{wx0.5} = k_{w1x} + k_{w3x} = 2,231mm$$

Alkujäykkyudeksi saadaan:

$$S_{ini} = 1 / (1 / k_{wx0.5} + 1 / k_{wx0.5}) * E = 234,36MN/m$$



Kuva A-0-2. 4x2 ja 4x3 ruuviryhmät.

Ruuviryhmä 4x2:

$$k_{wx0.5} = 2,231mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan:

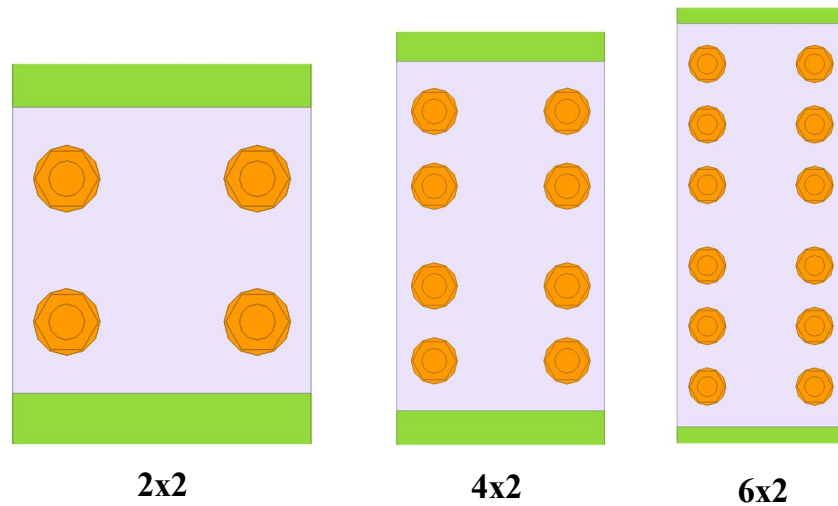
$$S_{ini} = 2 * 1 / (1 / k_{wx0.5} + 1 / k_{wx0.5}) * E = 468,72MN/m$$

Ruuviryhmä 4x3:

Alkujäykkyydeksi saadaan:

$$S_{ini} = 3 * 1 / (1 / k_{wx0.5} + 1 / k_{wx0.5}) * E = 703,08MN/m$$

Laskenta on suoritettu myös yksileikkeiselle liitokselle. Liitosta on jouduttu muokkaaamaan sopivaksi liitoksen tutkimisen kannalta niin, että molemmissa profiilin laipoissa yksileikkeiset ruuvit.



Kuva A-0-3. 2x2, 4x2 ja 6x2 ruuviryhmät.

Yksileikkeisen liitoksen erilaisten yhdistelmien kohdalla ei voida suoraan ottaa luvussa 4.3 esitettyjä jäykkyyksiä. Ensimmäisessä 2x2 ruuviryhmällä joudutaan käyttämään laippalevyn kohdalla k_{fp1bbx} kohdan jäykkyyttä ja taas uuman kohdalla k_{f5x} arvoa. Yksileikkeisessä liitoksessa molemmat laippalevyt ovat mukana liitoksen laskennassa, joten ruuvisarakeiden määrä on aina kaksinkertaisesti verrattuna kuvaan A-3

Ruuviryhmä 2x2:

$$k_{fx(2x2)} = 1 / (1 / 2k_{fp1bbx} + 1 / 2k_{fb} + 1 / k_{f5bbx}) = 1,033mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan:

$$S_{ini} = 4 * 1 / (1 / k_{fx(2x2)} + 1 / k_{fx(2x2)}) * E = 433,86MN/m$$

Ruuviryhmä 4x2:

$$k_{fx(4x2)} = 1 / (1 / k_{fp1bbx} + 1 / k_{fb} + 1 / k_{f3bbx}) + 1 / (1 / k_{fp3bbx} + 1 / k_{fb} + 1 / k_{f5bbx}) = 2,165mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan:

$$S_{ini} = 4 * 1 / (1 / k_{fx(4x2)} + 1 / k_{fx(4x2)}) * E = 909,3MN/m$$

Ruuviryhmä 6x2:

$$k_{fx} = 1,65mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan: $S_{ini} = 4 * k_{fx} * E = 1386,0MN/m$

Normaalivoimalle on laskettu vielä aksiaalialkujäykkyys niin, että se sisältää kaikki liitoksen osat. Tämä on sama kuin kaksileikkeisen uuman osalta ruuviryhmä 4x2 lasketaan yhteen laipan ruuviryhmä 6x2.

Koko liitoksen aksiaalialkujäykkyys:

$$S_{ini} = (4 * k_{fx} + 2 * k_{wx}) * E = 1854,7 MN/m$$

Liitoksesta lasketaan vahvemman suunnan alkukiertymäjäykkyys. Ensimmäisenä on laskettu liitos niin, että se sisältää pelkät laippalevyt. Tämä siitä syystä, että ekvivalentin momenttivarren määrittelyllä on suoraviivaista, eikä aiheuta virhettä tuloksiin.

Ekvivalentti momenttivarsi pelkille laipan levyille:

$$z_{eq} = 400 mm$$

Alkujäykkyys eurokoodin [7] mukaan:

$$S_{ini} = (E * z_{eq}^2) / (1/ 2k_{fx} + 1/ 2k_{fx}) = 55,46 MNm$$

Määritellään myös vahvemman suunnan alkukiertymäjäykkyys pelkästään uuman ruuvien varassa. Tällöin ekvivalentin momenttivarren suuruus on vielä suoraviivainen määrittää. Ekvivalentti momenttivarsi on:

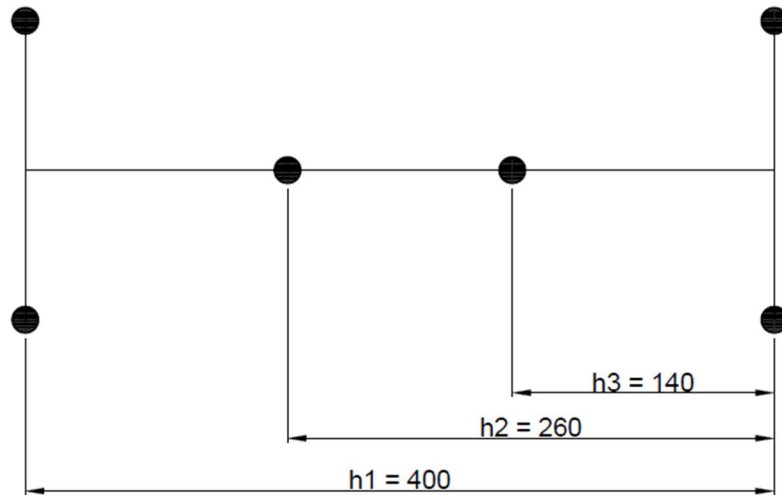
$$z_{eq} = 120 mm.$$

Alkujäykkyysdeksi saadaan:

$$S_{ini} = (E * z_{eq}^2) / (1/ k_{wx} + 1/ k_{wx}) = 1,69 MNm$$

Koko liitoksen vahvemman suunnan alkukiertymäjäykkyyttä tutkittaessa kohdataan ongelma ekvivalentin momenttivarren määrittämisessä. Tässä on tutkittu kaksi erilaista mahdollisuutta, ensimmäinen vaihtoehto on määritetty eurokoodin [7] mukaan. Tällöin puristuskeskiön ajatellaan sijaitsevan laipan kohdalla. Toisena vaihtoehtona ajateltu kimmoisen neutraaliakselin sijaitsevan keskellä profiilia ja näin ollen määritelty jäykkyysien suhteen eri puolilla olevien puristus ja vetokeskiöiden sijainti.

Ensimmäisessä vaihtoehto:



Kuva A-0-4. Ruuviryhmien sijainti puristuskeskiöstä.

Ruuviryhmien mukaiset jäykkyydet ovat seuraavat:

$$k_{eff1} = 2 * k_{fx} = 3,3mm,$$

$$k_{eff2} = k_{eff3} = k_{wx} = 1,116mm$$

$$z_{eq} = (\sum_r k_{effr} h_r^2) / (\sum_r k_{effr} h_r)$$

$$z_{eq} = \frac{k_{eff1} * h_1^2 + k_{eff2} * h_2^2 + k_{eff3} * h_3^2}{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2 + k_{eff3} * h_3} = 354mm$$

Tämän jälkeen on määritelty vedettyjen jousien ekvivalentti jäykkyys eurokoodin mukaisesti:

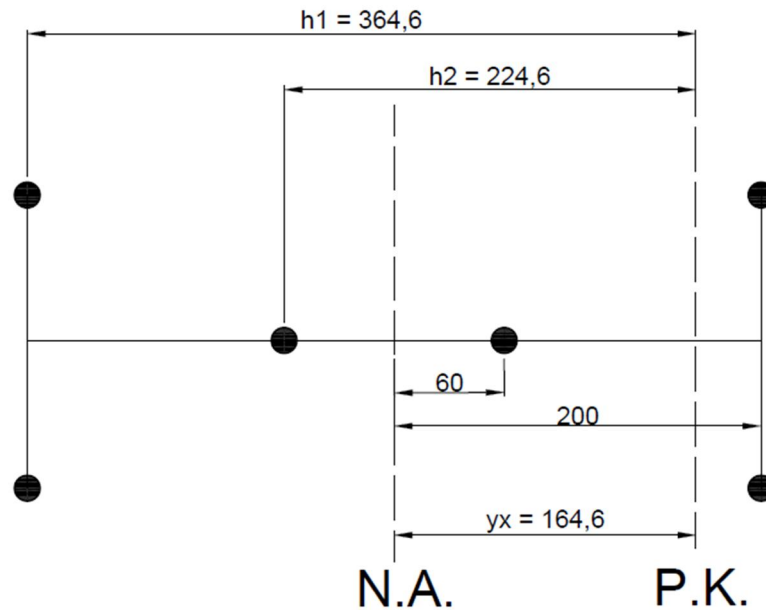
$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{effr} h_r}{z_{eq}} = \frac{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2 + k_{eff3} * h_3}{z_{eq}} = 4,99mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan:

$$S_{ini} = \frac{E * z_{eq}^2}{\frac{1}{k_{eq}} + \frac{1}{2k_{fx}}} = 52,27 MNm$$

Toisena vaihtoehtoisena tapana lasketaan puristuskeskiön sijainti neutraaliakselin jäykkyyksien suhteen. Ensimmäisenä lasketaan painopiste neutraaliakselin suhteen puristetuille jousille.

$$y_x = \frac{60\text{mm} * k_{wx} + 200\text{mm} * 2k_{fx}}{k_{wx} + 2k_{fx}} = 164,6\text{mm}$$



Kuva A-0-5. Mittoja puristuskeskiön (P.K.) suhteen.

Puristuskeskiön (P.K.) mukaan lasketaan ekvivalentti momenttivarsi liitokselle:

$$k_{eff1} = 2k_{fx} = 3,3\text{mm}$$

$$k_{eff2} = k_{wx} = 1,116\text{mm}$$

$$z_{eq} = \frac{k_{eff1} * h_1^2 + k_{eff2} * h_2^2}{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2} = 340,5\text{mm}$$

Vedetyille jousille määritetään ekvivalentti jäykkyystekijä:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{effr} h_r}{z_{eq}} = \frac{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2}{z_{eq}} = 4,27\text{mm}$$

Puristetun puolen jouset voidaan yhdistää rinnankytkennällä toisiinsa ja näin ollen on saatu alkukiertymäjäykkyys koko liitokselle vahvempaan suuntaan:

$$S_{ini} = \frac{E * z_{eq}^2}{\frac{1}{k_{eq}} + \frac{1}{2k_{fx} + k_{wx}}} = 52,86\text{ MNm}$$

Heikommassa suunnassa taivutetulle rakenteelle voidaan ajatella kaksi realistista tapaa määrittää ekvivalentti momentti varsi. Eurokoodin mukaisesti niin, että puristuskeskiö

ajatellaan olevan laipan ruuvisarakkeissa ja loput jouset ovat vedettyjä tai sitten samalla tapaa kuin aiemmin painopisteen laskennalla, jolloin uuman jäykkyys jätetään huomiotta.

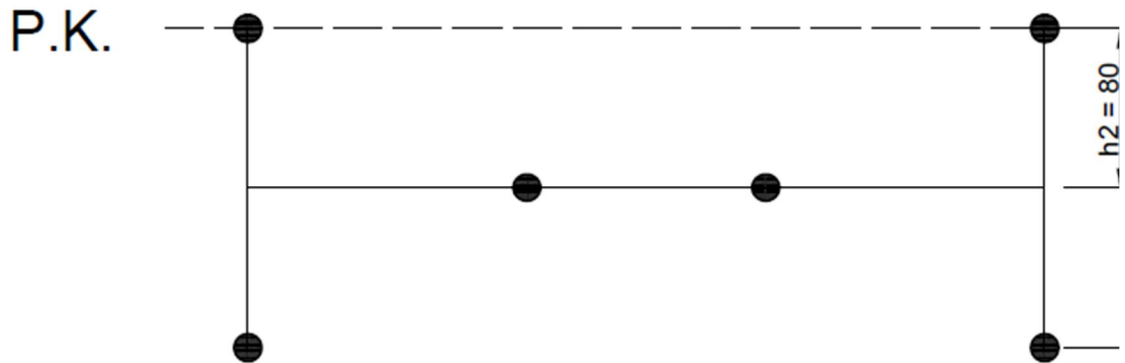
Ensimmäisessä vaihtoehdossa ekvivalentti momenttivarsi on suoraan ruuvisarakkeiden etäisyys.

$$z_{eq} = 160mm$$

Alkujäykkyydeksi saadaan siis:

$$S_{ini} = \frac{E * z_{eq}^2}{\frac{1}{2k_{fx}} + \frac{1}{2k_{fx}}} = 8,87 MNm$$

Toisena vaihtoehtona lasketaan eurokoodin mukaisesti ekvivalentti momenttivarsi sekä vedettyjen jousien ekvivalentti jäykkyys.



Kuva A-0-6. Ruuviryhmien sijainti puristuskeskiöstä.

Ruuviryhmien jäykkyyksiä:

$$k_{eff1} = 2k_{fx} = 3,3mm$$

$$k_{eff2} = 2k_{wx} = 2,232mm$$

Liitoksen ekvivalentti momenttivarsi:

$$z_{eq} = \frac{k_{eff1} * h_1^2 + k_{eff2} * h_2^2}{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2} = 139,8mm$$

Vedettyjen jousien ekvivalentti jäykkyys:

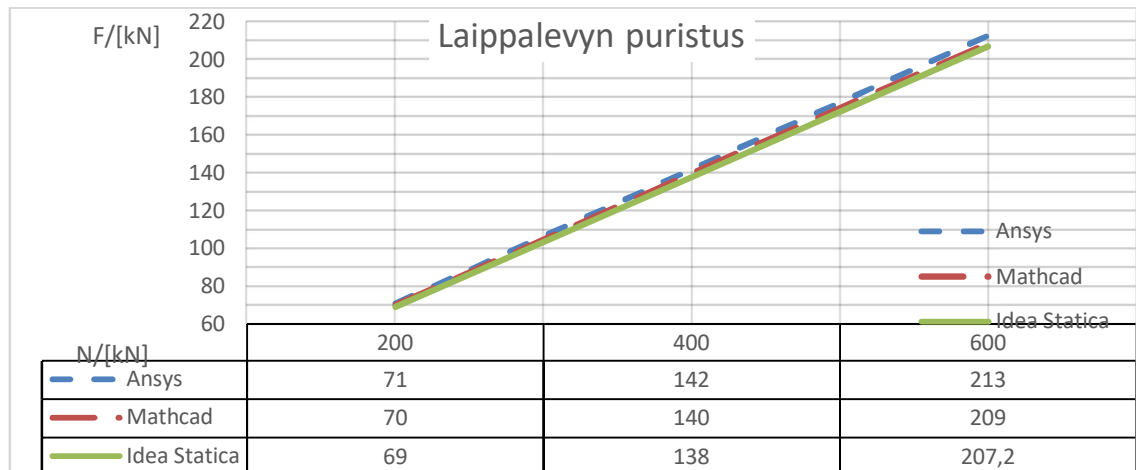
$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{effr} h_r}{z_{eq}} = \frac{k_{eff1} * h_1 + k_{eff2} * h_2}{z_{eq}} = 5,05mm$$

Liitoksen alkujäykkyydeksi heikompaan suuntaan saadaan:

$$S_{ini} = \frac{E * z_{eq}^2}{\frac{1}{k_{eq}} + \frac{1}{2k_{fx}}} = 8,19 \text{ MNm}$$

LIITE B: IDEA STATICAN VERTAILU AIKAISEMPIIN TULOKSIIN

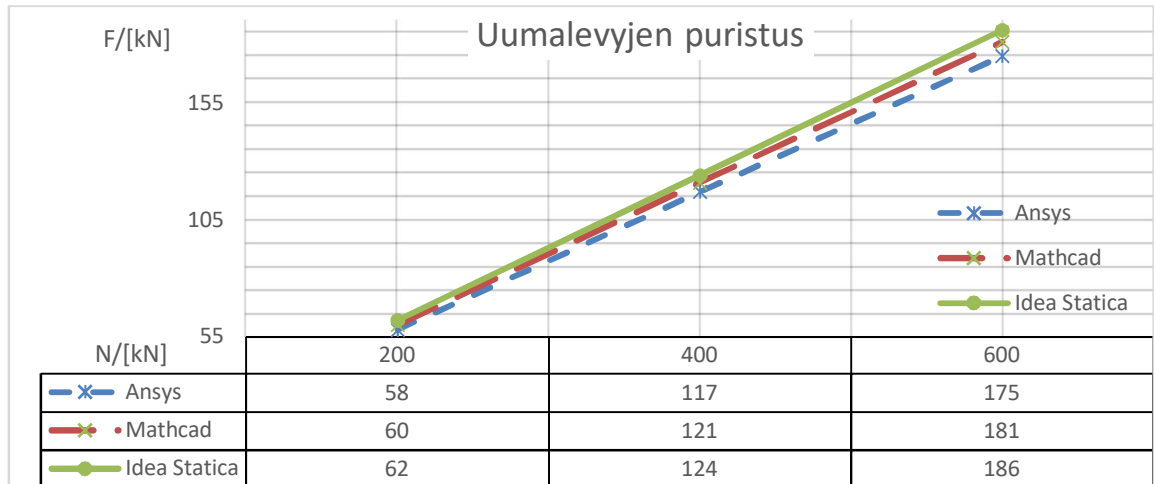
Tässä liitteessä on esitetty kuvaajien ja taulukoiden avulla eroavaisuuksia eri kuormitus-tapauksissa. Vertailu on tehty aikaisemmassa diplomityössä [6] saatuihin tuloksiin. Ensimmäisessä tapauksessa on normaalivoima N , jossa on tutkittu laippalevyn puristusta, laipan ruuvien leikkausta, uumalevyn puristusta sekä uuman ruuvien leikkausta. Normaalivoiman kuormitukset ovat: $N = [200; 400; 600]$ kNm.



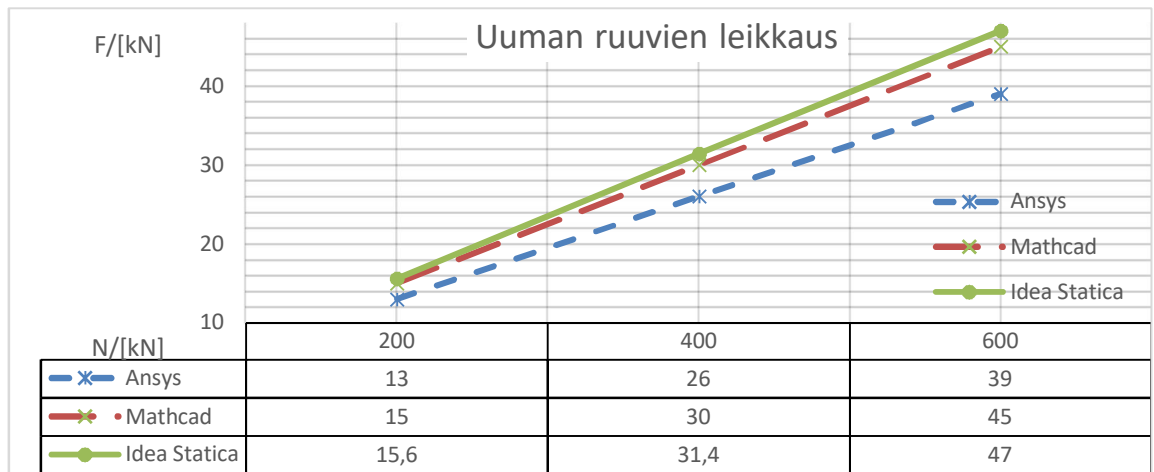
Kuva B-1 Eroavaisuudet laippalevyjen puristusvoimassa normaalivoimalla.



Kuva B-2 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa normaalivoimalla.

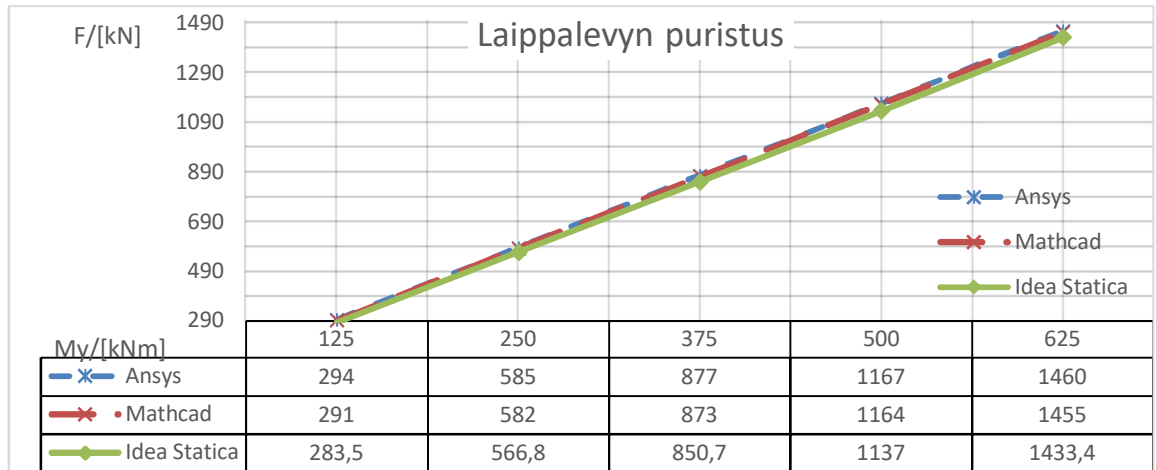


Kuva B-3 Eroavaisuudet uumalevyjen puristusvoimissa normaalivoimalla.

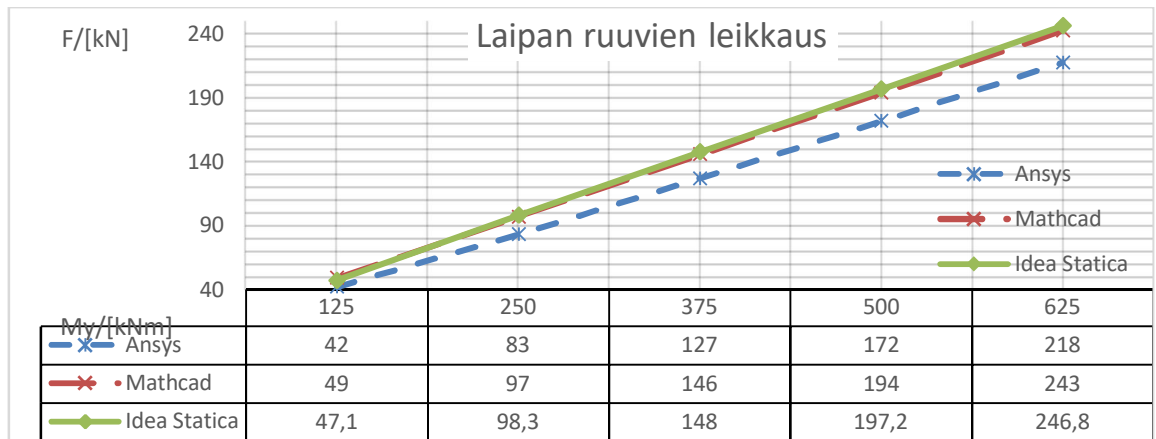


Kuva B-4 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa normaalivoimalla.

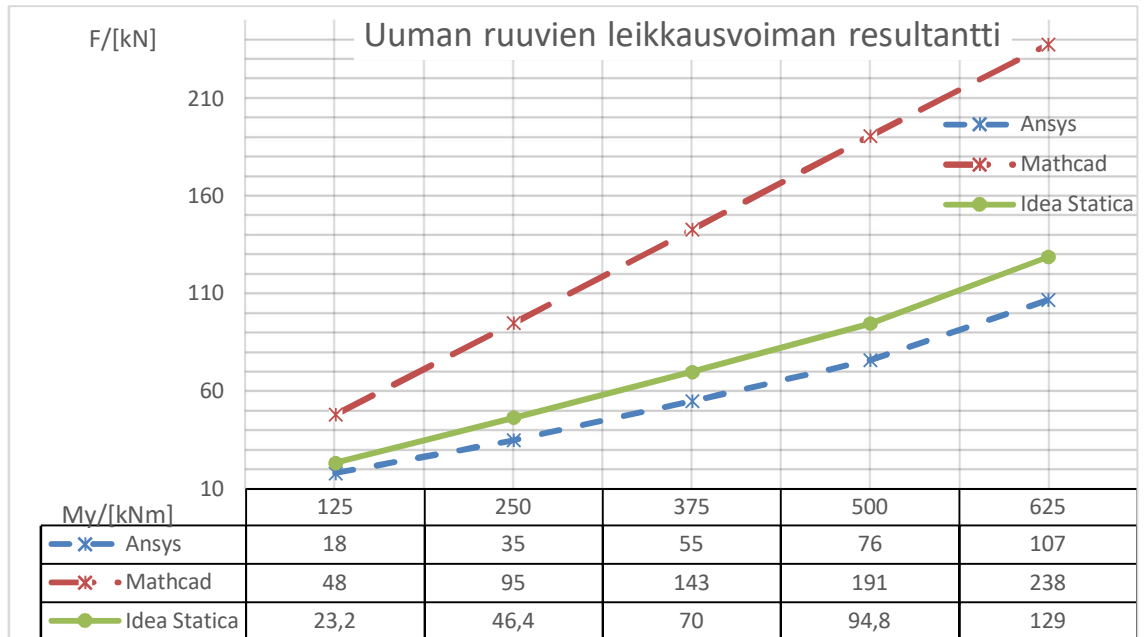
Toisena kuormitustapauksena on tutkittu vahvemman suunnan momenttia M_y . Tässä tilanteessa on vertailtu laippalevyn puristusta, laipan ruuvien leikkausta sekä uuman ruuvien voimia. Uuman ruuveja vertailtaessa Idea Statican tuloksista ei ole saatu kuin leikkausvoiman resultantti. Vahvemman suunnan kuormitukset ovat: $M_y = [125; 250; 375; 500; 625]$ kNm.



Kuva B-5 Eroavaisuudet laippalevyn puristusvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.

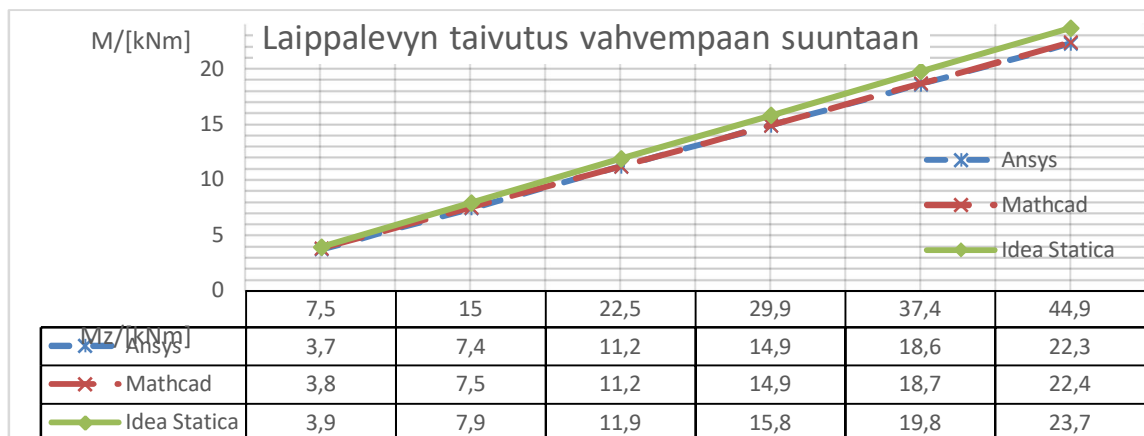


Kuva B-6 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.

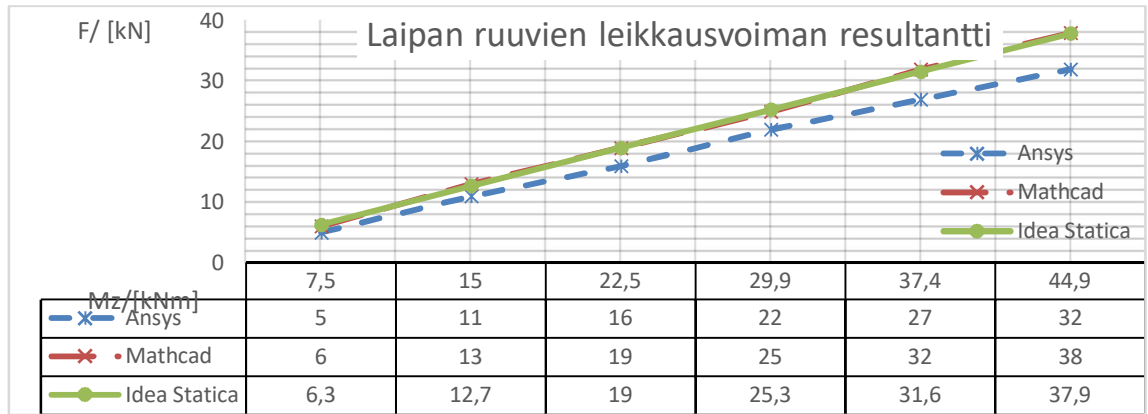


Kuva B-7 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa vahvemman suunnan taivutuksessa.

Kolmantena kuormitustapauksena on tutkittu heikomman suunnan taivutusta M_z . Tällä kuormitustapauksella on tutkittu laippalevyn taivutusta vahvempaan suuntaan sekä laipan ruuvien leikkausvoiman resultanttia. Laippalevyn taivutukseen on Idea Staticalla päästy luvussa 5.3 esitetyllä tavalla. Näitä on tutkittu eri kuormituksilla: $M_z = [7,5; 15; 22,5; 29,9; 37,4; 44,9]$ kNm.

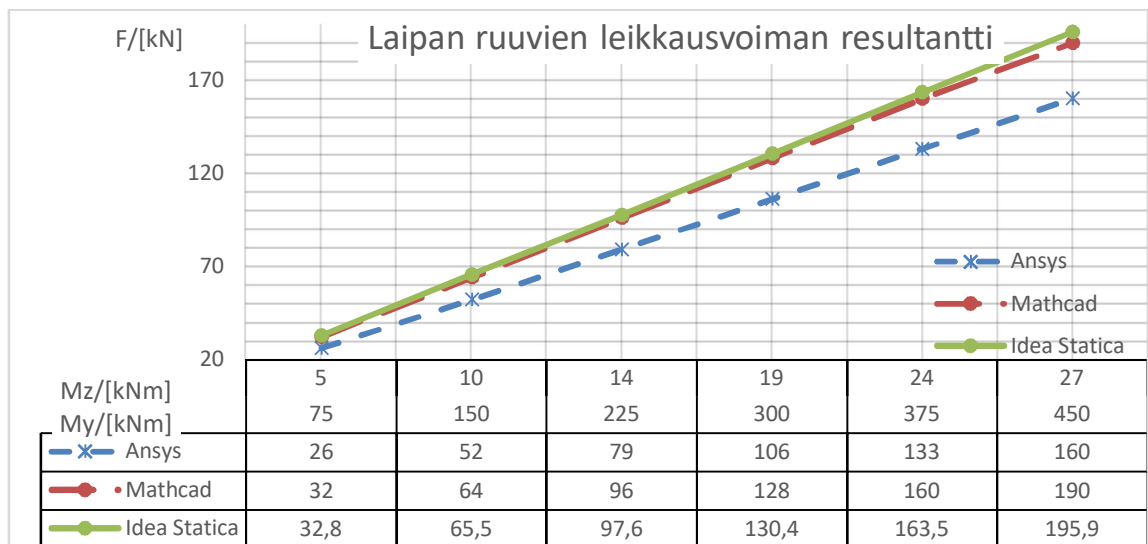


Kuva B-8 Eroavaisuudet laippalevyn taivutusmomentille heikomman suunnan taivutuksessa.

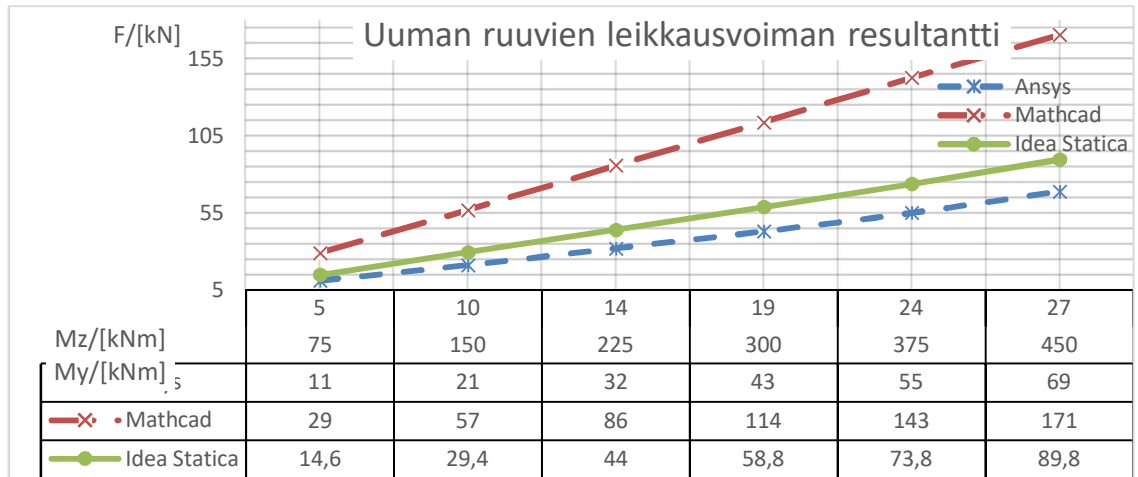


Kuva B-9 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimille heikomman suunnan taivutuksessa.

Seuraavaksi vertailussa on molempiin suuntiin taivutettu rakenne. Vahvempaan suuntaan oleva momentti M_y sekä heikompaan suuntaan oleva momentti M_z . Näillä kuormituksilla on tutkittu laipan ja uuman ruuvien leikkausvoiman resultanttia. Kuormituksina on toiminut: $M_z = [5; 10; 14; 19; 24; 27]$ kNm ja $M_y = [75; 150; 225; 300; 375; 450]$ kNm.

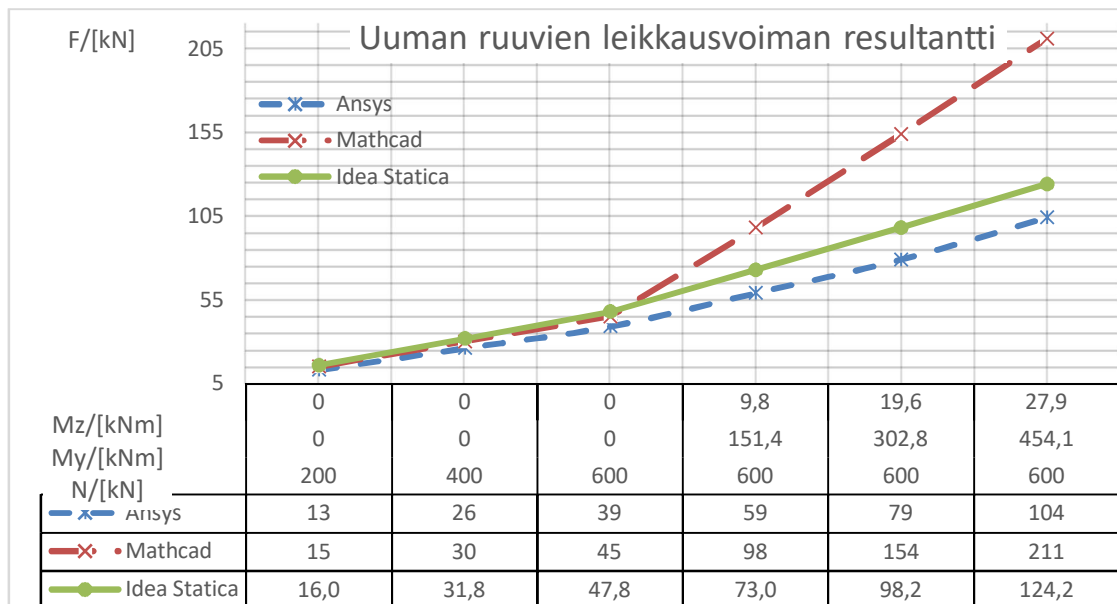


Kuva B-10 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa molempiin suuntiin taivutulla rakenteella.

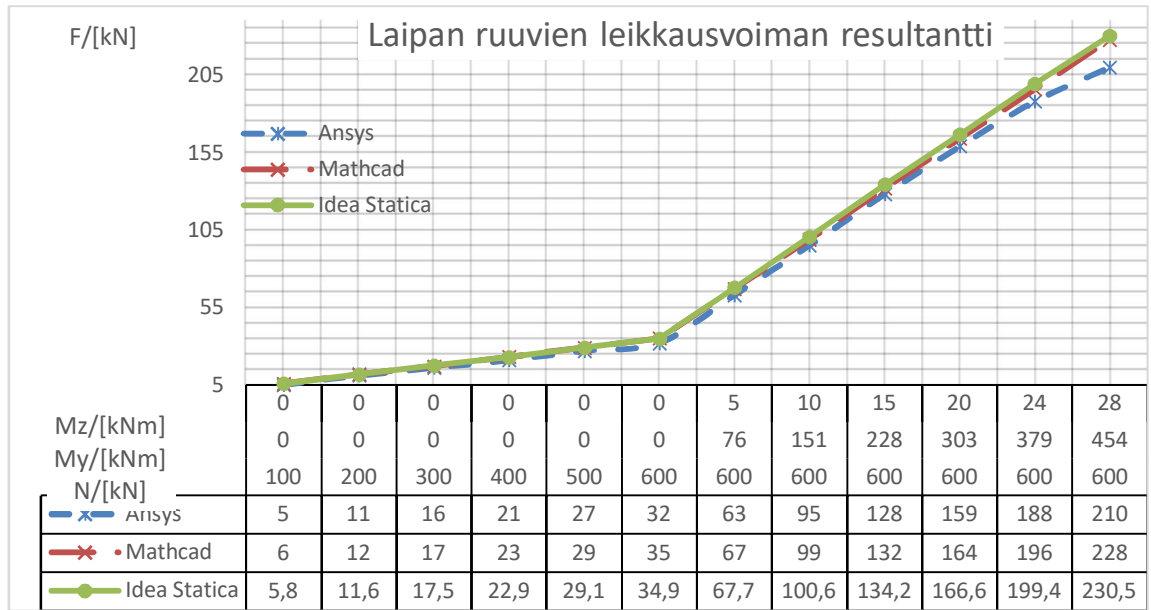


Kuva B-11 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa molempiin suuntiin taivutella rakenteella.

Viimeisenä kuormitustapauksena tutkittiin normaalivoiman N , vahvemman suunnan momentin M_y sekä heikomman suunnan momentin M_z yhteisvaikutusta. Tutkittavia tapauksia olivat laipan ja pultin ruuvien leikkausvoimaresultantti. Kuormituksina toimivat: $N = [200; 400; 600; 600; 600; 600]$ N, $M_y = [0; 0; 0; 151,4; 302,8; 454,1]$ kNm sekä $M_z = [0; 0; 0; 9,8; 19,6; 27,9]$ kNm.



Kuva B-12 Eroavaisuudet uuman ruuvien leikkausvoimissa yhdistetyssä kuormitustapauksessa.



Kuva B-13 Eroavaisuudet laipan ruuvien leikkausvoimissa yhdistetyssä kuormitustapauksessa.